

# СОДЕРЖАНИЕ

Том 86, номер 1, 2022

## Специальный выпуск: Проблемы деградации земель и устойчивого землепользования Выпускающий редактор: Г.С. Куст

### ПРОБЛЕМЫ ДЕГРАДАЦИИ ЗЕМЕЛЬ И УСТОЙЧИВОГО ЗЕМЛЕПОЛЬЗОВАНИЯ

От редактора выпуска	5
Интеграция международной и национальной систем мониторинга и оценки деградации земель в России <i>В. А. Лобковский, О. В. Андреева, Г. С. Куст</i>	9
Проблемы адаптации степного землепользования к антропогенным и климатическим изменениям (на примере Оренбургской области) <i>Ю. А. Гулянов, А. А. Чибилёв (мл.), А. А. Чибилёв, С. В. Левыкин</i>	28
Динамика деградации земель в Ростовской области <i>О. С. Безуглова, И. Н. Ильинская, В. Е. Закруткин, О. Г. Назаренко, Ю. А. Литвинов, Э. А. Гаевая, А. А. Меженков, А. И. Жумбей</i>	41
Методические подходы и практическое применение результатов оценки деградации земель/почв Беларуси <i>А. Н. Червань, Н. Н. Цыбулько, В. М. Яцухно</i>	55
Пространственная дифференциация сельскохозяйственного производства в России в условиях природного и социального опустынивания <i>Т. Г. Нефедова</i>	69
Влияние изменения климата на экосистемные услуги лесных земель Юга Восточной Сибири <i>Б. З. Цыдыпов, Е. Ж. Гармаев, Б. О. Гомбоев, А. А. Аюржанаев, Б. В. Содномов, С. Д. Пунцукова, С. Г. Андреев, М. А. Мотошкина</i>	82
Роль весенне-летних засух в динамике аридизации засушливых земель Европейской территории России <i>А. Н. Золотокрылин, Е. А. Черенкова, Т. Б. Титкова</i>	98
Динамика площади озер в степной зоне Алтайского края в условиях антропогенного воздействия и климатических изменений <i>Д. В. Черных, Р. Ю. Бирюков, Д. К. Першин</i>	109
Динамика площади гарей в зональных ландшафтах юго-востока европейской части России <i>С. С. Шинкаренко, В. В. Дорошенко, А. Н. Берденгалиева</i>	122

Зависимость микробиологической активности и химических характеристик  
почвы от топографической позиции на старопахотных участках  
черноземной лесостепи

*Д. В. Карелин, П. Р. Цымбарович*

---

---

134

# Contents

---

---

**Volume 86, No 1, 2022**

---

---

**Special Issue: Land Degradation and Sustainable Land Management**  
**Guest Editor: G.S. Kust**

Editor's Foreword <i>G. S. Kust</i>	5
Using National System of Land Monitoring for Assessment of Land Degradation Neutrality in Russia  <i>V. A. Lobkovskiy, O. V. Andreeva, and G. S. Kust</i>	9
Problems of Steppe Land Use Adaptation to Anthropogenic and Climatic Changes (the Case of Orenburg Oblast)  <i>Yu. A. Gulyanov, A. A. Chibilyov (jr.), A. A. Chibilyov, and S. V. Levykin</i>	28
Dynamics of Land Degradation in Rostov Oblast  <i>O. S. Bezuglova, I. N. Ilyinskaya, V. E. Zakrutkin, O. G. Nazarenko, Yu. A. Litvinov, E. A. Gayevaya, A. A. Mezhenkov, and A. I. Zhumbey</i>	41
Methodological Approaches and Practical Application of the Results of Land/Soil Degradation Assessment in Belarus  <i>A. M. Chervan, M. M. Tsybulka, and V.M. Yatsuhno</i>	55
Spatial Differentiation of Agricultural Production in Russia in Conditions of Natural and Social Desertification  <i>T. G. Nefedova</i>	69
Impact of Climate Change on Ecosystem Services of Forest Lands in the Southern Part of Eastern Siberia  <i>B. Z. Tsydyпов, E. Zh. Garmaev, B. O. Gomboev, A. A. Ayurzhanayev, B. V. Sodnomov, S. D. Puntsukova, S. G. Andreev, and M.A. Motoshkina</i>	82
Role of Spring–Summer Drought in the Dynamics of Aridization of Arid Lands in European Russia  <i>A. N. Zolotokrylin, E. A. Cherenkova, and T. B. Titkova</i>	98
Dynamic Changes of the Steppe Zone Lakes in Altai Krai under Anthropogenic Impacts and Climate Change  <i>D. V. Chernykh, R. Yu. Biryukov, and D. K. Pershin</i>	109
Burned Areas Dynamics in Zonal Landscapes of the South-East of the European Part of Russia  <i>S. S. Shinkarenko, V. V. Doroshenko, and A. N. Berdengalieva</i>	122



## ПРОБЛЕМЫ ДЕГРАДАЦИИ ЗЕМЕЛЬ И УСТОЙЧИВОГО ЗЕМЛЕПОЛЬЗОВАНИЯ

### От редактора выпуска

DOI: 10.31857/S2587556622010083

Идея специального выпуска научного журнала «Известия РАН. Серия географическая», посвященного проблемам деградации земель и устойчивого землепользования, возникла по итогам Международной конференции «Деградация земель и опустынивание: проблемы устойчивого природопользования и адаптации», прошедшей в два этапа в Институте географии РАН: в ноябре 2020 и марте 2021 гг. Материалы для публикации из представленных на конференции докладов (доступны на eLIBRARY.RU: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44463100>), были отобраны оргкомитетом конференции и обсуждены на расширенном заседании экспертного совета Центра по борьбе с опустыниванием и засухой имени Н.Ф. Глазовского.

Представленные в спецвыпуске оригинальные научные статьи и обзоры отражают как географическое разнообразие исследованных регионов (Забайкалье, Юг Западной Сибири, Южный Урал, Северный и Северо-Западный Прикаспий, Приазовье, Центральное Черноземье, Республика Беларусь), так и разнообразие отраслей географической науки: изучение природных и антропогенных факторов и механизмов развития геосистем; изменения природной среды и климата; территориальная организация населения и экономики; эколого-географические аспекты природопользования; картографическое моделирование и дистанционное зондирование и др.

Отбор статей проведен таким образом, чтобы их содержание отвечало наиболее актуальным вопросам в области деградации земель и опустынивания, как в глобальном, так и национальном аспектах: стратегическое планирование в области решения вопросов деградации земель и опустынивания с учетом международного опыта, прогноз изменений климата в основных сельскохозяйственных регионах, принципы выбора индикаторов достижения нейтрального баланса деградации земель на национальном уровне для отражения выполнения задачи 15.3 Повестки 2030, географическое разнообразие и региональные особенности проявлений деградации земель и их связи с проблемами изменения климата и сохранения биологического разнообразия.

Такой набор статей отражает целостность современных представлений в данной тематической области и отвечает задачам Стратегии Конвенции ООН по борьбе с опустыниванием (КБО)

на 2018–2030 гг. в области научных исследований, способствует развитию новых научных направлений. Цель данного спецвыпуска – стимулировать расширение спектра географических и геоэкологических представлений о деградации земель и методах устойчивого землепользования, которые до недавних пор традиционно связывались в основном с почвами и сельским хозяйством. Современные международные представления о проблеме деградации земель (Конвенция ООН по борьбе с опустыниванием, принятая в 1994 г.) отражают интегрированное понимание земель как наземной биопродуктивной системы, включающей в себя почву, местные водные ресурсы, растительность и прочую биомассу, а также экологические и гидрологические процессы, происходящие внутри системы. И что не менее важно – не просто ограниченное понимание опустынивания как некоего индивидуального процесса, свойственного засушливым регионам, а целостное восприятие деградации земель как явления, которое в условиях изменений климата и растущей хозяйственной деятельности приобретает важное значение для человечества и имеет тесную связь с климатом, обеспечением продовольственной безопасности, сохранением биологического разнообразия, а также с разумным использованием экосистемных услуг, доступностью водных и почвенных ресурсов.

Последние несколько лет проблема деградации земель все чаще связывается с вопросами миграции и трудовыми ресурсами, гендерными проблемами и другими социально-экономическими процессами и факторами. Не случайно результатом такого интегрированного восприятия деградации земель стало ее включение в специальные доклады Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК), Межправительственной научно-политической платформы по биоразнообразию и экосистемным услугам (МПБЭУ) и в итоге – включение специальной задачи в Цели устойчивого развития ООН на период до 2030 г. с индикатором 15.3.1 – доля деградированных земель от общей площади суши. В мировой научной литературе проблема деградации земель и устойчивого землепользования все чаще связывается не только с сельскохозяйственными землями, но и землями других категорий – лесами, землями промышленности и транспорта, го-

родскими и селитебными землями, особо охраняемыми территориями и др.

В данный выпуск вошли как работы, подготовленные в развитие новейших глобальных концепций (в частности, концепции нейтрального баланса деградации земель НБДЗ, в оригинале Land Degradation Neutrality, LDN), так и сделанные в классическом стиле, с описанием особенностей деградации земель и проблем землепользования в определенных регионах. Значительное внимание в выпуске уделено методическим вопросам, в первую очередь гармонизации глобальных и национальных индикаторов деградации земель – читателю интересно будет сравнить в этом аспекте подходы в России и Беларуси. Так, если в Беларуси такая система индикаторов, учитывающая НБДЗ, разработана и успешно функционирует, то в России она еще далека от совершенства и практически не используется для предотвращения деградации земель и их восстановления, при обосновании и внедрении инновационных агротехнологий, совершенствовании территориально-планировочных мероприятий, смягчении последствий изменения климата. Вместе с тем российскими авторами предлагается более эффективный оригинальный подход по интеграции динамических индикаторов и индикаторов состояния, чего нет в Беларуси.

Региональные оценки деградации земель, представленные в этом выпуске журнала, также отличаются оригинальностью и новизной. Например, для Ростовской области впервые за много лет отмечена стабилизация содержания гумуса в почвах агроландшафтов, хотя подавляющее большинство работ, анализирующих аналогичные процессы в России, свидетельствует об обратном. На примере Оренбургской области показаны возможности оптимизации структуры степного землепользования с учетом современных вызовов, включая возрастающую антропогенную нагрузку и изменения климата. Наблюдения за снижением числа и площади степных пожаров в Северном Прикаспии из-за роста поголовья скота и вовлечения залежей в севооборот отличаются постановкой вопроса от устоявшегося мнения о том, что пастбищное животноводство и распашка земель в этом регионе служат только ведущими причинами опустынивания.

В некоторых работах нашли отражение идеи о расширении возможностей использования ряда индикаторов деградации земель и эффективности устойчивого землепользования, а также о расширении спектра индикаторов. Среди таковых, помимо предлагаемых Конвенцией ООН по борьбе с опустыниванием в качестве базовых индикаторов – динамика наземного покрова, продуктивности и запасов почвенного углерода, называются также: показатели эрозии почв как фактора, снижающего активность биоты; ландшафтное и биологическое разнообразие; показатели изменения

засушливости/аридности; частота лесных и степных пожаров; динамика площади озер; изменения в повторяемости засух в различные сезоны. Несмотря на относительно небольшое количество представленных в выпуске работ, по ним легко можно сделать вывод о значительном географическом разнообразии процессов деградации земель, степени и скорости их проявления, в том числе и на сравнительно небольших площадях.

Новым представляется и взгляд климатологов на ведущие факторы деградации земель: значение имеет не просто традиционное соотношение тепла и влаги, отражаемое различными индексами, как это принято считать в “классических” представлениях, но и их сезонное распределение, что также неоднородно может проявляться в различных регионах и быть весьма чувствительным к климатическим изменениям.

Социально-экономическая сторона проблемы отражена в данном выпуске через результаты исследования факторов пространственной трансформации сельского хозяйства: природных, институционально-экономических и социальных. В результате, предлагается различать природное и социальное опустынивание; показано, что последнее развивается как результат социально-экономической дифференциации сельской местности и сельской депопуляции, усиления организационной и пространственной концентрации и поляризации производства. Это, в свою очередь, ведет к тому, что сельскохозяйственное землепользование, а особенно производство зерна в России, сдвигается в южные регионы и становится более чувствительным к климатическим и погодным колебаниям, несмотря на модернизацию производства.

Почти в каждой работе этого выпуска рассматриваются факторы и/или предлагаются меры, способствующие сохранению баланса деградации земель, предупреждению рисков, снижению отрицательных последствий деградации земель, восстановительным мероприятиям, адаптации управления к изменению климата и природной среды. Все это в совокупности может служить основой для всестороннего понимания причин деградации земель для разработки комплексной государственной программы по ее профилактике и восстановлению нарушенных и деградированных земель в условиях современных климатических и социально-экономических вызовов.

*Г. С. Култ*

*Институт географии РАН, Москва, Россия*

## Editor's Foreword

The idea of this special issue of the academic peer-reviewed journal "Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya" devoted to the problems of land degradation and sustainable land management followed results of the International conference "Land Degradation and Desertification: Problems of Sustainable Land Management and Adaptation", which was held at the Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences in two stages (November 2020 and March 2021). Proceedings of the conference (available on: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44463100>) were reviewed and selected by the organizing committee of the conference and recommended for publication by the extended meeting of the expert council of the Center for Combating Desertification and Drought named after N.F. Glazovsky.

The original scientific articles and reviews presented reflect both the geographical diversity of the studied regions (Transbaikalia, the South of Western Siberia, the Southern Urals, the Northern and North-Western Caspian region, the Azov region, the Central Chernozem region, the Republic of Belarus) and the diversity of geographical science: natural and anthropogenic factors and mechanisms of geosystems development; changes in climate and natural environment; territorial organization of the population and economy; ecological and geographical aspects of natural resource management; cartographic modeling and remote sensing, etc.

The selection of articles was carried out to find their content correspondence to the most pressing issues of land degradation and desertification, both globally and nationally: strategic planning and international experience in addressing land degradation and desertification actions, forecasting climate change in the main agricultural regions, principles for the selection of indicators for achieving land degradation neutrality at national level to reflect the achievement of target 15.3 of the UN SDGs 2030, geographic diversity and regional peculiarities of land degradation and linkage to climate change and biodiversity conservation.

This basket of papers reflects the integrity of modern ideas in this thematic area and meets the objectives of the 2018–2030 Strategy of the UN Convention to Combat Desertification (UNCCD) in the field of scientific research, contributes to the development of new scientific directions. The purpose of this special issue is to stimulate the expansion of the range of geographic and geocological concepts of land degradation and sustainable land management, which, until recently, have traditionally been associated mainly with soils and agriculture. Modern international understanding of the problem of land degradation reflects, firstly, an integrated understanding of land as a terrestrial bioproductive system, which includes soil, local water resources, vegetation, and other biota, as

well as ecological and hydrological processes taking place within the system; and secondly, not just a limited understanding of desertification as a kind of individual process inherent in arid regions, but a holistic perception of land degradation as a phenomenon that, in the context of climate change and growing economic activity, becomes globally important and closely related to climate, food security, biodiversity conservation, as well as to the reasonable use of ecosystem services, availability of water and soil resources. Over the past few years, the problem of land degradation has been increasingly linked to issues of migration and labor resources, gender issues and other socioeconomic processes and factors. It is no coincidence that such an integrated perception of land degradation was included in the special reports of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services (IPBES), and, as a result, the specific indicator 15.3.1 included in the system of UN Agenda 2030: "Proportion of land that is degraded over total land area". In the world scientific literature, the problem of land degradation and sustainable land management is increasingly associated not only with agricultural land, but also with other landtypes – forests, industrial and transport lands, urban and residential lands, protected areas, etc.

This issue includes both works fulfilled in the development of the new global concepts (in particular, the concept of Land Degradation Neutrality, LDN), and those classical papers describing peculiarities of land degradation and land use problems in certain regions. The issue pays considerable attention to methodological aspects, primarily to the harmonization of global and national indicators of land degradation; it might be interesting for the reader to compare those approaches in Russia and Belarus. So, if in Belarus such a system of indicators, taking LDN into account, has been developed and is successfully functioning, in Russia it is still far from perfect and practically not used to prevent land degradation and restoration, for justification and introducing innovative agricultural technologies, improving territorial planning measures, for mitigation of the effects of climate change. At the same time, Russian authors propose a more effective original approach to the integration of dynamic indicators and indicators of the state of land (land quality).

The regional assessments of land degradation presented in this issue are also original and novel. For example, for Rostov oblast for the first time during a long-term period the stabilization of soil organic content (humus) was noted, although the majority of works analyzing similar processes in Russia indicates the opposite. On the example of Orenburg oblast, the possibilities of optimizing the steppe land use structure are shown, taking into account modern challenges including the increasing human impact and climate

change. Observations of a decrease in the number and area of steppe fires in the Northern Caspian region due to an increase in livestock and the involvement of fallow lands in crop rotation differ from the traditional opinion that grazing and plowing of land in this region are only the leading causes of desertification.

Some works reflect the idea of expanding the use of a number of indicators of land degradation and of the effectiveness of sustainable land management, as well as about expanding the range of indicators. Among those, in addition to global indicators recommended by the UNCCD (dynamics of land cover, productivity, and soil organic carbon stock), are also named: indicators of soil erosion as a factor that reduces the activity of biota, landscape and biological diversity; indicators of change in aridity; frequency of forest and steppe fires; dynamics of the area of lakes; changes in the frequency of droughts in different seasons. Despite the relatively small number of works presented in the issue, it can be easily noticed that there is a significant geographic diversity of land degradation processes, their degree and rate, including those occurring in relatively small areas. The view of climatologists on the leading factors of land degradation is also new: not only the traditional ratio of heat and moisture, reflected by various "classical" indices, is important, but also their seasonal distribution, which can also be heterogeneous in different regions and highly sensitive to climate change.

The socioeconomic side of the problem is reflected in this issue through the results of a study of natural, institutional, economic and social factors of spatial transformation of agriculture. As a result, it is proposed to distinguish between natural and social desertification. It is shown that the latter develops as a result of socioeconomic differentiation in rural areas and rural depopulation, increased organizational and spatial concentration, and polarization of production. This, in turn, promotes the shifting of arable farming and especially grain production in Russia to the southern regions and becoming more sensitive to climatic and weather fluctuations, despite the modernization of business.

Almost every paper in this issue considers factors and/or proposes measures that contribute to maintaining the land degradation neutrality, preventing risks, reducing the negative consequences of land degradation, restoring measures, and adapting management to climate and environmental changes. All this together can serve as the basis for an integrated understanding of the causes of land degradation for the development of a comprehensive state program for its prevention and restoration of disturbed and degraded lands in the face of modern climatic and socioeconomic challenges.

*G. S. Kust*

*Institute of Geography, Russian Academy of Sciences,  
Moscow, Russia*



## ПРОБЛЕМЫ ДЕГРАДАЦИИ ЗЕМЕЛЬ И УСТОЙЧИВОГО ЗЕМЛЕПОЛЬЗОВАНИЯ

УДК 504.4:502.11

### ИНТЕГРАЦИЯ МЕЖДУНАРОДНОЙ И НАЦИОНАЛЬНОЙ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА И ОЦЕНКИ ДЕГРАДАЦИИ ЗЕМЕЛЬ В РОССИИ

© 2022 г. В. А. Лобковский<sup>а</sup>, \*, О. В. Андреева<sup>а</sup>, Г. С. Куст<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Институт географии РАН, Москва, Россия

\*e-mail: v.a.lobkovskiy@igras.ru

Поступила в редакцию 27.07.2021 г.

После доработки 12.09.2021 г.

Принята к публикации 12.10.2021 г.

Действия по оценке и борьбе с опустыниванием на международном уровне в настоящее время связаны, прежде всего, с реализацией новейшей методологии нейтрального баланса деградации земель (НБДЗ) в рамках достижения Целей устойчивого развития ООН (ЦУР) по задаче 15.3. Установлено, что в действующей российской системе статистического учета земель отсутствуют показатели для мониторинга деградации земель для всех категорий, кроме сельскохозяйственных, которые могли бы соответствовать индикаторам НБДЗ. В работе показаны возможности интеграции индикаторов и показателей качества земель, используемых в России, в глобальную систему. С этой целью предлагается упорядочить данные различных ведомств через общую согласованную непротиворечивую надстройку, базирующуюся на индикаторах НБДЗ, для которой предложен набор требований. Предложена принципиальная схема формирования и иерархическая структура для системы индикаторов деградации земель в России, включающая, с одной стороны, динамические индикаторы, характеризующие достижение НБДЗ, а с другой – индикаторы состояния, характеризующие качество земель (по рискам и результатам деградации) по отношению к целевым задачам их использования в рамках соответствующих категорий. С использованием этих подходов проведен предварительный анализ и отбор показателей из числа действующих в различных ведомственных системах для интеграции в систему глобальной оценки на основе методологии НБДЗ. Дальнейшие пути интеграции национальной и международной систем оценки деградации земель представляются следующим образом: а) разработка универсального федерального списка индикаторов и показателей для земель разного назначения (категорий и угодий); б) использование универсальных качественных шкал индикаторов при варьировании количественных значений их показателей (по регионам, отраслям, категориям земель и пр.); в) использование сравнительных шкал качества земель по отношению как к лучшим (максимизация показателей), так и/или к худшим (минимизация показателей) объектам в данной местности/регионе.

**Ключевые слова:** деградация земель, риск деградации, нейтральный баланс деградации земель, система показателей, индикаторы деградации земель, базовая линия, устойчивое развитие

**DOI:** 10.31857/S2587556622010095

#### ПРОБЛЕМАТИКА И ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Борьба с деградацией земель и опустыниванием – одно из приоритетных направлений государственной политики РФ, учитывающее основные направления глобального развития, выраженные в Целях устойчивого развития ООН (ЦУР) (UN, 2015).

Выполнение задачи 15.3.1 ЦУР<sup>1</sup>, направленной на поддержание и восстановление потенциала земельных ресурсов, рассматривается в кон-

тексте недопущения их дальнейшей деградации по сравнению с современной ситуацией, принимаемой в качестве базовой линии для анализа будущих изменений (UNCCD, 2016).

Статистической комиссией ООН утвержден глобальный индикатор достижения задачи 15.3.1 – доля деградированных земель от общей площади суши (UNSD, 2016), а “куратором” достижения этой задачи определена Конвенция ООН по борьбе с опустыниванием (КБО ООН) (Orr et al., 2017).

Способ формирования этого индикатора на глобальном уровне детально описан нами в предыдущих публикациях (Andreeva, Kust, 2020; Kust et al., 2018) и предполагает оценку нейтраль-

<sup>1</sup> “К 2030 году бороться с опустыниванием, восстанавливать деградированные земли и почвы, в том числе земли, затронутые опустыниванием, засухой и наводнениями, и стремиться к достижению нейтрального баланса деградации земель” (UNCCD, 2016, с. 5).

ного баланса деградации земель (НБДЗ). НБДЗ, в свою очередь, оценивается по значениям трех *основных* индикаторов – динамики наземного покрова, продуктивности земель и запасов почвенного органического углерода (ПОУ) (“*прокси-индикаторы*”), которые определяются на основе *показателей (measures)*, содержащихся в международных базах данных. Основные индикаторы могут заменяться и/или дополняться на уровне отдельной страны или местности. При любом уровне оценки важным является использование принципа “полного охвата” (“one out – all out”), т.е. негативное значение динамики любого из принятых индикаторов указывает на деградацию земель за рассматриваемый временной период. Такой подход позволяет получать информацию о деградации земель практически для любого участка земной поверхности в динамике, в сравнении с принятым исходным состоянием – “базовой линией”. В качестве базовой линии КБО ООН рекомендует использовать усредненные значения соответствующих показателей за 2001–2015 гг.

Указанный способ оценки деградации земель фактически определяет необходимость достижения и поддержания баланса (или улучшения состояния) в природных и управляемых системах вне зависимости от их природного потенциала и условий, определяющих их устойчивость (Куст и др., 2021; Национальный ..., 2019). В практическом смысле это означает не ухудшать состояние земель по сравнению с базовым. В случае невозможности сохранить и/или приумножить земельный капитал в конкретном месте (например, в результате строительных работ или нарушений, связанных с добычей некоторых полезных ископаемых) допускается его компенсация путем восстановления ранее деградированных земель в сходных природных условиях.

Внедрение единого международного алгоритма для установления задач достижения НБДЗ позволило решить проблему унификации методов оценки деградации земель в глобальном аспекте. Недостатки такого подхода очевидны, поскольку в число “не деградированных” земель за фиксированный период времени (например, последние 15–20 лет) могут попадать земли, истощенные и испорченные в более ранние годы, однако одновременно он имеет определенные преимущества, позволяя установить ясные критерии и стимулы для предотвращения дальнейшего ухудшения. На этих принципах оценки деградации земель разработан специальный расчетный модуль “Тренды.Земля”<sup>2</sup> геоинформационной платформы Quantum GIS (QGIS), позволяющий

<sup>2</sup> Trends.Earth. A new tool to assess the health of the land that supports us. <https://www.conservation.org/about/trends-earth> (дата обращения 13.07.2021).

получить как статистические (таблицы), так и картографические (растровые карты с пространственным разрешением 250–300 м в пикселе) данные по каждому из индикаторов НБДЗ. Важной особенностью системы оценки НБДЗ является ее открытость, т.е. возможность дополнения индикаторами и статистическими данными, отражающими национальные приоритеты и местные условия (UN, 2017).

Концепция НБДЗ – одна из основополагающих для осуществления Стратегии КБО ООН. Понятия “земля” и “деградация земель” рассматриваются КБО ООН комплексно, с учетом изменения состояния разных компонентов наземной биопродуктивной системы (почвы, местные водные ресурсы, растительность и прочая биомасса, рельеф), а также происходящих внутри системы процессов. Нетрудно заметить, что такой подход созвучен ландшафтной и/или геосистемной парадигмам, сосуществующим в отечественной географии.

В 2017 г. Генеральная Ассамблея ООН приняла резолюцию (UN, 2017), утвердившую систему глобальных показателей ЦУР и рекомендовавшую национальным статистическим системам изучать пути интеграции глобальных и национальных данных, исходя из приоритетов отдельных стран, местных условий и имеющегося статистического потенциала (UN, 2017). Сложность интеграции национальных и международных показателей деградации земель в России долгое время была связана с тем, что понятие “деградация земель” существовало только для категории земель сельскохозяйственного назначения. Это не позволяло напрямую применять международные подходы оценки НБДЗ для сбора статистических данных по земельному фонду страны в целом.

Первый шаг к решению этой проблемы был сделан в апреле 2021 г., когда Национальным стандартом РФ в российское правовое поле впервые было введено понятие “деградация земель”<sup>3</sup>, в редакции, идентичной определению КБО ООН<sup>4</sup>. Несмотря на это, интегрального индикатора, отражающего деградацию земель и соответ-

<sup>3</sup> ГОСТ Р 59055–2020. Национальный стандарт Российской Федерации. Охрана окружающей среды. Земли. Термины и определения (утв. и введен в действие Приказом Росстандарта от 30.09.2020 № 707–ст).

<sup>4</sup> “Деградация земель – снижение или потеря биологической и экономической продуктивности и сложной структуры богарных пахотных земель, орошаемых пахотных земель или пастбищ, лесов и лесистых участков в засушливых, полузасушливых и сухих субгумидных районах в результате землепользования или действия одного или нескольких процессов, в том числе связанных с деятельностью человека и структурами расселения, такими, как: ветровая и/или водная эрозия почв; ухудшение физических, химических, биологических и экономических свойств почв; долгосрочная потеря естественного растительного покрова”.



**Рис. 1.** Основные особенности, определяющие необходимость адаптации методологии глобальной оценки НБДЗ на национальном уровне.

ствующего индикатору ЦУР 15.3.1, в системе государственного мониторинга земель России нет<sup>5</sup>. С этой целью необходимо разработать научное обоснование и методологию анализа состояния земель и рисков их деградации исходя из международных индикаторов НБДЗ, определить пути интеграции существующих отраслевых систем в систему международных показателей.

Сложность расчета индикатора ЦУР 15.3.1 для России связана с несколькими причинами.

Во-первых, как показывает наш опыт использования системы Тренды.Земля (Беляева и др., 2020; Куст и др., 2018; Andreeva, Kust, 2020; Kust et al., 2018), результаты расчета ориентированы преимущественно на получение сравнительных оценок для отдельных стран; для России с ее большой площадью система корректно работает только на региональном уровне. Проведенная нами для некоторых областей России верификация результатов по оценке динамики наземного покрова по дистанционным данным с пространственным разрешением 300 м показала, что ошибки при распознавании переходов классов

наземного покрова составляют не более 10–20%, что в целом на фоне незначительных изменений в исследуемых регионах составляет небольшую величину (Беляева и др., 2020). В то же время, при локальных оценках с помощью системы Тренды.Земля ошибки при распознавании переходов классов наземного покрова значительно искажают действительную картину (Беляева и др., 2020). Использование данных о запасах углерода глобальной базы данных о почвах SoilGrid (ISRIC) также отличается неточностью (Национальный ..., 2019).

Вторая причина заключается в необходимости адаптировать глобальный механизм расчета НБДЗ для использования на национальном уровне с учетом разнообразия физико-географических, социально-экономических, институциональных и управленческих особенностей России, схематично отраженных на рис. 1.

В-третьих, в России, в силу сложившейся практики, основное внимание при оценке состояния земель уделяется только почвам. Для них, в частности, разработана система почвенных экологических нормативов (в том числе нормативов загрязнения и деградации почв) (Макаров и др., 2014). Параметры состояния других компонентов природной среды (водных объектов, раститель-

<sup>5</sup> Статус разработки показателей ЦУР. Федеральная служба государственной статистики (Росстат), 2021. <https://rosstat.gov.ru/sdg/reporting-status> (дата обращения 13.07.2021).



Рис. 2. Министерства и ведомства РФ – потенциальные участники процесса достижения целей НБДЗ в России.

ности, рельефа) при оценке деградации земель, как правило, не принимаются во внимание.

В современной ситуации, когда достижение НБДЗ становится одной из главнейших стратегических задач КБО ООН и зафиксировано в глобальных ЦУР, оценка и мониторинг состояния земель без учета индикаторов НБДЗ, опирающиеся только на традиционные отраслевые системы оценки качества земель, представляются некорректными.

Цель данной работы состояла, прежде всего, в том, чтобы показать возможности интеграции индикаторов и показателей качества земель, используемых в России на местном и (реже) субнациональном и национальном уровнях, в глобальную систему. Научное обоснование такой интеграции позволит, с одной стороны, систематизировать существующие национальные показатели деградации земель на новой методологической базе, а с другой – непротиворечиво вписать национальные системы мониторинга земель в глобальные оценки.

## МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

### *Система глобальных индикаторов деградации земель*

В основу исследования лег анализ системы глобальных индикаторов деградации земель, предлагаемой КБО ООН (Orr et al., 2017). Результаты нашего анализа представлены в табл. 1.

### *Система национальных индикаторов деградации земель*

Круг министерств и ведомств – потенциальных участников процесса достижения целей НБДЗ в России достаточно широк (рис. 2). Каждый федеральный орган исполнительной власти (ФОИВ) выполняет свою роль в системе утверждения показателей и индикаторов, сбора данных и мониторинга, анализа полученных результатов и составления государственной отчетности, однако основная информация по показателям деградации земель в государственной статистической системе аккумулируется двумя ведомствами. Так, Минсельхозом в контексте возможных процессов деградации земель оцениваются земли сельскохозяйственного назначения, а Росреестром – все другие земли. При этом номенклатура показателей, используемых для государственного мониторинга земель (ГМЗ), в них не совпадает, что не позволяет проводить федеральную оценку деградационных явлений и процессов земельного фонда по единым критериям (табл. 2).

Сравнение ведомственных систем ГМЗ показало, что группировка земель для оценки развития и распространения негативных процессов, применяемая Росреестром, не в полной мере соответствует типологии, используемой в действующих нормативно-методических документах Минсельхоза по выявлению деградированных и загрязненных земель. По сути, хорошо согласуются только показатели для эродированных и загрязненных (химически и радиоактивно) земель. В то же время, значительные площади засолен-

Таблица 1. Система индикаторов оценки деградации земель на глобальном уровне

		Индикаторы НБДЗ		
		динамика наземного покрова	динамика продуктивности земель	динамика запасов поу
	Индикатор ЦУР 15.3.1 “Доля деградированных земель от общей площади суши”			
Критерий оценки	Доля земель, подверженных неблагоприятным природным и антропогенным процессам	Количественная оценка территории по типам наземного покрова	Продуктивность земель (биопродуктивность), в том числе пахотных, пастбищных и лесных земель по качественным признакам	Запас ПОУ
Источники данных для расчета	Расчетные значения прокси-индикаторов	Данные ESA-CCI-LC 210**	Gio Global Land Component – по индексу NDVI***	Данные ISRIC****
Оценка состоятельности	Доля деградированных земель	1. Площадь по 37 классам наземного покрова, га 2. Площадь по 6 обобщенным типам наземного покрова, га*	1. Значения NDVI для различных природных объектов 2. Значения NDVI по 6 обобщенным классам наземного покрова*	1. Запасы ПОУ: по 6 обобщенным типам наземного покрова*, т/га 2. Общие запасы ПОУ, т
	% (количественная)	Площади, занятые разными типами наземного покрова (количественная), га	Площади земель с разной продуктивностью, по обобщенным типам наземного покрова (количественная), га	Запасы ПОУ по обобщенным типам наземного покрова (количественная)
Оценка динамики	Площади земель, деградированных/улучшенных (проградированных) по отношению к базовой линии отсчета	1. Динамика наземного покрова 2. Трансформация (переходы) основных типов на земного покрова в другие земли 3. Динамика (баланс) площадей по 37 классам/6 типам наземного покрова	Классы динамики продуктивности земель	1. Динамика запасов ПОУ по 6 обобщенным типам наземного покрова* (т/га) усредненная по почвенному профилю 0–30 см****, т 2. Динамика площади земель с различными запасами ПОУ по 6 классам наземного покрова, га

Таблица 1. Окончание

		Индикаторы НБДЗ		
	Индикатор ЦУР 15.3.1 “Доля деградированных земель от общей площади суши”	динамика наземного покрова	динамика продуктивности земель	динамика запасов поу
Шкала оценки	Матрица оценки соотно- шения динамики по трем индикаторам НБДЗ с уче- том принципа “полного охвата” (качественная)	Качественная, три градации: 1) деградированные, 2) стабильные, 3) улучшенные. Для оценки используется специально разрабо- танная матрица переходов из одного типа наземного покрова в другой	Качественная, пять градаций: 1) снижение, 2) умеренное снижение, 3) стабильное состояние, подвержен- ное риску; 4) стабильное состояние, не подверженное риску, 5) повышение	Качественная, три градации дина- мики запасов ПОУ: 1) снижение запасов, 2) стабильное состояние, 3) повышение запасов
Градационные шкалы оценки	Количественная оценка: площадь земель, га Качественная оценка: Улучшение Стабильность Деградация	Улучшенные, % Стабильные, % Деградированные, %	Улучшенные, % Стабильные, % Деградированные, %	Улучшенные, % Стабильные, % Деградированные, %
Методика рас- чета	ГИС-модуль Тренды.Земля. Анализ динамики прокси-инди- каторов НБДЗ на основе принципа “полного охвата”	ГИС-модуль Тренды.Земля. Возможна корректировка алго- ритма оценки – изменение значе- ния (+/-) типов переходов наземного покрова	ГИС-модуль Тренды.Земля	ГИС-модуль Тренды.Земля

Составлено авторами с использованием “Рамочного руководства для НБДЗ” (Ong et al., 2017).

Примечание: \* 6 обобщенных типов наземного покрова: 1) пахотные (сельскохозяйственные) угодья; 2) леса; 3) земли под травянистой растительностью, кустарниками, мо-  
хово-лишайниковой растительностью, разреженной растительностью разных типов; 4) водно-болотные угодья; 5) искусственные поверхности; 6) обнаженные поверхности  
и прочие земли; \*\* ESA, 2015. European Space Agency’s Climate Change Initiative Land Cover. <http://www.esa-landcover-cci.org>; \*\*\* Gio, 2015. Gio Global Land Component. Lot 1  
“Operation of the Global Land Component” Framework Serv. Contract № 388533 (JRC). Product user manual. Leaf Area Index. 2015. Ver. 1. Iss. 12:20. [http://icdc.cen.uni-hamburg.de/fil-  
eadmin/user\\_upload/icdc\\_Dokumente/COPERNICUS\\_LAND/GIO\\_GLI\\_PUM\\_LAIVI\\_12.20.pdf](http://icdc.cen.uni-hamburg.de/fil-<br/>eadmin/user_upload/icdc_Dokumente/COPERNICUS_LAND/GIO_GLI_PUM_LAIVI_12.20.pdf); \*\*\*\* Global Support Programme, 2017. Land Degradation Neutrality Target Setting  
Programme Methodological note to set national voluntary Land Degradation Neutrality (LDN) targets using the UNCCD indicator framework. [https://knowledge.unccd.int/sites/de-  
fault/files/2018-08/LDN%20Methodological%20Note\\_02-06-2017%20ENG.pdf](https://knowledge.unccd.int/sites/de-<br/>fault/files/2018-08/LDN%20Methodological%20Note_02-06-2017%20ENG.pdf); \*\*\*\*\* ISRIC, 2017. International Soil Reference and Information Centre. <http://www.isric.org/>.

**Таблица 2.** Сопоставление показателей деградации земель, используемых при ГМЗ сельскохозяйственных и несельскохозяйственных земель

ГМЗ по развитию и распространению негативных процессов*	ГМЗ по показателям состояния плодородия земель сельскохозяйственного назначения**
Нарушение земель (нарушенные земли)	Общие показатели (мощность гумусового горизонта, см; уклоны поверхности, °) Физические и химические показатели
Загрязнение химическими веществами и соединениями	Показатели загрязнения почв (тяжелые металлы, пестициды, нефть)
Радиоактивное загрязнение	Показатели загрязнения почв (экспозиционная доза, плотность загрязнения)
Эрозия: водная, ветровая, линейная	Показатели негативных процессов (эрозия)
Опустынивание	Не приводится
Захламление	Не приводится
Заболачивание	Не приводится
Переувлажнение	Показатели негативных процессов (переувлажнение)
Иные негативные процессы	Показатели негативных процессов (засоление, солонцы, каменистость) Дополнительные показатели для почв неиспользуемых земель (закустаренность, залесенность, зарастание сорняками) Биологическая активность

*Примечание:* \* Приказ Росреестра от 26.06.2015 № П/343 “Об утверждении Порядка организации деятельности и взаимодействия территориальных органов и структурных подразделений Федеральной службы государственной регистрации, кадастра и картографии при осуществлении государственного мониторинга земель”; \*\* Приказ Минсельхоза России от 04.05.2010 № 150 “Об утверждении Порядка государственного учета показателей состояния плодородия земель сельскохозяйственного назначения”. Бюлл. нормативных актов федеральных органов исполнительной власти. № 32.

ных земель и солонцов в составе несельскохозяйственных земель входят в группу “иные негативные процессы”, а для земель сельскохозяйственного назначения их площадь выделяется отдельной строкой. Понятия “нарушение земель”, а также “захламление” и “заболачивание” для сельскохозяйственных земель вообще не используются.

Указанные обстоятельства являются основной причиной того, что составить единую картину о деградации земель в России по единой методике не представляется возможным. Чтобы достичь этой цели и, соответственно, найти корректные подходы к интеграции национальных систем оценки деградации земель в глобальную оценку, нам представляется наиболее оптимальным упорядочить данные различных ведомств через общую согласованную непротиворечивую надстройку, базирующуюся на международных подходах – на индикаторах ЦУР 15.3.1 и НБДЗ. При этом методической основой, объединяющей ведомственные данные, могут успешно служить принятые законодательством “категории земель”. Соответствие категорий земель и используемых для них ведомственных показателей деградации земель представлено в табл. 3.

#### *Требования к национальным индикаторам НБДЗ*

В нашей работе мы исходили из следующих основных требований к обновлению российской национальной системы индикаторов и показателей деградации земель на основе интеграции существующих отраслевых систем:

1. Методически не противоречить глобальной системе индикаторов, что обеспечит возможность интеграции глобальных и российских данных.
2. Использовать отраслевые показатели деградации земель, мониторинг которых проводится ФОИВ в порядке, утвержденном соответствующими законодательными и нормативно-правовыми актами.
3. Быть гибкой, обеспечивая достаточное информационное наполнение при минимизации общего числа показателей.
4. Учитывать природно-ландшафтную дифференциацию страны, обуславливающую разнообразие природно-хозяйственных условий России.
5. Использовать для оценки единую систему качественных индикаторов, реализуемых через количественные показатели деградации земель, при

**Таблица 3.** Ведомственные системы наблюдений за состоянием земель и их качеством по категориям земель

Категория земель	ФОИВ (краткое наименование)
1. Земли сельскохозяйственного назначения	Минсельхоз
2. Земли населенных пунктов	Росреестр
3. Земли промышленности, энергетики, транспорта, связи, радиовещания, телевидения, информатики, земли для обеспечения космической деятельности, земли обороны, безопасности и земли иного специального назначения	– (сведения о состоянии земель формирует Росреестр)
4. Земли особо охраняемых территорий и объектов	Минприроды
5. Земли лесного фонда	Рослесхоз
6. Земли водного фонда	Росводресурсы
7. Земли запаса	– (сведения о состоянии земель формирует Росреестр)

этом последние могут различаться в зависимости от региональных и отраслевых особенностей.

6. Учитывать не только факторы и результаты актуальных воздействий на природную среду, но и историческую динамику этих воздействий.

Принципиальная структура национальных индикаторов деградации земель с учетом перечисленных требований может быть представлена в виде следующей схемы (рис. 3).

Как можно заметить из предлагаемой нами схемы, ее главная особенность заключается не просто в интеграции глобальных и национальных/отраслевых индикаторов и показателей, а в согласовании динамических индикаторов, на которых строится оценка НБДЗ, начиная с глобального уровня и ниже, с индикаторами состояния, преобладающими в системе ГМЗ и используемыми преимущественно для местных оценок с их последующей генерализацией.

Чтобы система индикаторов деградации земель была достаточно гибкой для оценки в различных природно-хозяйственных условиях, нами предлагается рассматривать две категории из числа индикаторов и показателей, используемых в российских законодательных и нормативно-правовых актах. Первая – основные индикаторы – включает аналоги глобальных индикаторов (ЦУР 15.3.1 и НБДЗ), которые в основном могут применяться на глобальном и региональном уровнях для оценки динамики деградации земель. Вторая категория – преимущественно национальные показатели состояния земель, отражающие риски, а также результаты деградации в результате воздействия разных факторов и вызванных ими процессов (эрозия почв, нарушение водного режима, засоление и осолонцевание, химическое и радиоактивное загрязнение и др.).

Для реализации данного подхода необходимо в первую очередь систематизировать отраслевые показатели, связанные с деградацией земель, содержащиеся в действующей нормативно-правовой базе, и выделить из них те, которые могут использоваться в качестве аналогов глобальных индикаторов и для оценки качества земель в контексте концепции НБДЗ. Именно этому вопросу и посвящена данная статья.

Для систематизации индикаторов и показателей деградации земель, представленных в российских законодательных и нормативно-правовых актах, нами предлагается следующая иерархическая структура (рис. 4).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

### *Сравнительный анализ отраслевых показателей деградации земель, отражающих возможность достижения НБДЗ на национальном уровне*

Для систематизации показателей по пяти группам (см. рис. 4), нами был проведен анализ действующей российской законодательной и нормативно-правовой базы. Всего с учетом изложенных выше требований было проанализировано 174 показателя, содержащихся в 33 нормативно-правовых источниках, в том числе в “Положении о разработке, установлении и пересмотре нормативов качества окружающей среды для химических и физических показателей состояния окружающей среды”<sup>6</sup>, “Порядке государственно-

<sup>6</sup> Постановление Правительства РФ от 13.02.2019 № 149 “О разработке, установлении и пересмотре нормативов качества окружающей среды для химических и физических показателей состояния окружающей среды, а также об утверждении нормативных документов в области охраны окружающей среды, устанавливающих технологические показатели наилучших доступных технологий”. Собрание законодательства РФ. 25.02.2019. № 8. Ст. 778.



го учета показателей состояния плодородия земель сельскохозяйственного назначения”<sup>7</sup>, “Порядке организации деятельности и взаимодействия территориальных органов и структурных подразделений Федеральной службы государственной регистрации, кадастра и картографии при осуществлении государственного мониторинга земель”<sup>8</sup>, “Методических рекомендациях по выявлению деградированных и загрязненных земель”<sup>9</sup> и др. Каждый показатель относили к какой-либо из 18 групп/подгрупп, представленных на рис. 4, и рассматривали по следующим позициям: тип оценки (количественная или качественная), шкала оценки, интервалы/градации (при наличии), нормативный источник показателя. Для демонстрации итогов этого этапа работы в табл. 4 представлен фрагмент оценочной таблицы для подгруппы “1. Деградация почвенно-земельных ресурсов (по развитию и распространению негативных процессов) – 1.1.1 Эрозия почв водная и ветровая”.

Проделанная работа позволила создать информационную базу для анализа разнородных показателей и обоснования рекомендаций по включению их в национальную систему оценки.

Анализ этой информации показал, что сложившаяся в законодательстве ситуация с разобщенностью определений понятия “деградация земель” во многом связана с отраслевым принципом хозяйственной деятельности и слабой координацией между ФОИВ. Как показал анализ индикаторов (см. табл. 2), для качественной оценки показателей используется разное число градаций для сходных в целом шкал (от трех до пяти), что затрудняет их сопоставление. Более того, граничные значения градаций также зачастую не совпадают. Например, суммарный показатель загряз-

нения почв в разных документах имеет разные названия и градации шкал оценки, хотя он для всех показателей рассчитывается как сумма отношения концентрации загрязняющих веществ к фону (ПДК) (табл. 5).

*Пути выбора индикаторов и показателей  
для интеграции в глобальную систему  
оценки деградации земель*

Как было отмечено выше, подход КБО ООН к оценке деградации земель через индикаторы НБДЗ оценивает динамику качества земель через положительные и отрицательные тренды (улучшение–стабильность–деградация), но не позволяет сравнивать земли по абсолютным показателям качества, как, например, возможно при бонитировке. Именно поэтому, например, ранее опустыненные земли Северо-Западного Прикаспия, но сохраняющие стабильность в течение последних 15–20 лет (если 15-летний период принять за базовую линию), могут оказаться по индикаторам НБДЗ в более “выгодном” состоянии, чем теряющие свое плодородие (но медленно и постепенно) черноземные степи Русской (Восточно-Европейской) равнины или длительно орошаемые земли низовий Дона или Кубани, которые в силу некоторых обстоятельств могут быть временно выведены из орошения.

В этой ситуации для сохранения объективности при оценке земель целесообразно рассматривать их деградацию с обеих позиций – как с целью оценки динамики по индикаторам НБДЗ, так и с целью оценки текущего состояния земель в контексте их современного природного потенциала и рисков проявления деградационных процессов. Для этого разные показатели качества земель, используемые в отраслевых системах оценки, были проанализированы по критерию “динамические–статические”. Мы предположили, что к динамическим следует отнести показатели, которые могут измеряться с определенной периодичностью и характеризовать площадное распространение деградационных процессов, а к статическим – показатели, в большей мере характеризующие эксплуатационные качества земель в зависимости от их целевого назначения (категорий земель). Использование этого подхода позволило агрегировать ведомственные показатели с разными количественными шкалами в единую систему и вычленил среди них те, которые могут, с одной стороны, служить для интеграции в систему глобальной оценки с помощью подходов НБДЗ, а с другой – могут быть использованы для оценки динамики и качества земель на местном или субнациональном уровне.

Указанная задача решалась в два этапа. На первом этапе проводился отбор показателей для интеграции в систему глобальной оценки на ос-

<sup>7</sup> Приказ Минсельхоза России от 04.05.2010 № 150 “Об утверждении Порядка государственного учета показателей состояния плодородия земель сельскохозяйственного назначения”. Бюлл. нормативных актов федеральных органов исполнительной власти. № 32; Приказ Минсельхоза России от 02.12.2020 года № 729 “О внесении изменений в приказ Минсельхоза России от 4 мая 2010 г. № 150 “Об утверждении Порядка государственного учета показателей состояния плодородия земель сельскохозяйственного назначения”. Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. <https://docs.cntd.ru/document/573200400?marker>.

<sup>8</sup> Приказ Росреестра от 26.06.2015 № П/343 “Об утверждении Порядка организации деятельности и взаимодействия территориальных органов и структурных подразделений Федеральной службы государственной регистрации, кадастра и картографии при осуществлении государственного мониторинга земель”.

<sup>9</sup> Письмо Роскомзема от 27.03.1995 № 3-15/582 “О Методических рекомендациях по выявлению деградированных и загрязненных земель” (вместе с “Методическими рекомендациями по выявлению деградированных и загрязненных земель”, утв. Роскомземом 28.12.1994, Минсельхозпродом России 26.01.1995, Минприроды России 15.02.1995).



Рис. 3. Принципиальная схема формирования структуры национальных индикаторов деградации земель и НБДЗ.

нове подхода НБДЗ. Одно из основных требований этого подхода заключалось в необходимости сравнения с базовой линией (Лобковский и др., 2020). Поэтому важно использовать такие показатели, для которых можно проводить регулярный мониторинг и рассчитывать усредненные значения за период времени, принимаемый за базовый. Вместе с тем, для расчета доли деградированных земель в системе государственной статистики РФ традиционно используются площадные показатели, значения которых могут быть напрямую применены для индикатора ЦУР 15.3.1 (табл. 6, блок 1). Учет их суммы при условии исключения пересекающихся данных представляет весьма перспективным в качестве основной (первичной) оценки. Поскольку решение проблемы пересекающихся данных при сохранении ведомственного разделения проблематично и может быть осуществлено только при полной унификации отраслевых алгоритмов оценки, относимых на конкретные категории земель, находящиеся в веде-

нии определенных ФООИВ, то альтернативным способом может служить использование трех «прокси-индикаторов» НБДЗ при условии их дополнения/замены или отождествления с имеющимися национальными индикаторами (или их определенным набором), а также с учетом принципа «полного охвата» (см. табл. 6, блоки 2–4). Основания для замены или отождествления могут выбираться в зависимости от специфики физико-географических условий местности, на что указывают отдельные исследования последних лет. В них отмечалась возможность использования в разных случаях: показателей увлажнения почв (Kuderina et al., 2020; Shcherba et al., 2016), показателей динамики и риска почвенной эрозии (Tsybarovich et al., 2020), динамики лесных экосистем, в том числе частоты пожаров и площади рубок (Птичников и др., 2019), состояния ненарушенных экосистем ООПТ (Куст и др., 2021). Вместе с тем, как можно заметить из результатов анализа системы национальных индикаторов, отражен-



**Рис. 4.** Иерархическая схема индикаторов и показателей деградации земель, представленных в российских законодательных и нормативно-правовых актах.

*Примечание:* \* представление об опустынивании в российской нормативно-правовой системе не соответствует КБО ООН, где под опустыниванием понимается комплекс процессов, включающих в том числе эрозию, дефляцию, засоление, осолонцевание, уплотнение и пр. (Kust, 2011).

ных в табл. 6, не для всех случаев деградации земель и не для всех категорий земель и угодий можно подобрать аналоги индикаторов и показателей НБДЗ из числа традиционно используемых в отраслевых руководствах. Для этих ситуаций предстоит либо более тщательная разработка дополнительных показателей (в том числе по аналогии с используемыми для иных категорий земель и угодий), либо прямое применение индикаторов НБДЗ, получаемых с использованием международных баз данных и модуля Тренды.Земля.

На втором этапе нашего исследования решался вопрос согласования дополнительных динамических индикаторов, отражающих достижения НБДЗ, и показателей качественного состояния, отражающих потенциал земель и риски деградации (табл. 7). Основное их отличие в контексте использования концепции НБДЗ в качестве ос-

новы для их интеграции заключается в том, что если для оценки достижения НБДЗ по динамическим индикаторам необходимо “всего лишь” установить условную базовую линию, определяемую как усредненное значение показателей конкретного индикатора за определенный промежуток времени, то для оценки качественного состояния этого недостаточно. В этом случае требуется знание о составляющих максимального и/или минимального земельного потенциала для конкретных физико-географических и социально-экономических условий. Примером таких оценок может служить бонитировка почв или растительности, основанная на широко распространенном подходе максимизации показателей – сравнение состояния объектов с наилучшими/эталонными в данной местности/регионе, или эколого-генетическая оценка опустынивания, основанная на

**Таблица 4.** Фрагмент оценочной таблицы показателей деградации земель по подгруппе показателей 1.1.1, Эрозия почв водная и ветровая (формулировки показателей приведены в соответствии с оригинальными источниками)

Показатель оценки	Качественная шкала оценки	Количественная шкала оценки	Источник данных		
Уменьшение мощности почвенного профиля (A + B), % от исходного	Недеградированные (ненарушенные) Слабо деградированные Средне деградированные Сильно деградированные Очень сильно деградированные (разрушенные)	Степень 0: <3 Степень 1: 3–25 Степень 2: 26–50 Степень 3: 51–75 Степень 4: >75	Письмо Роскомзема от 27.03.1995 № 3-15/582*		
Уменьшение запасов гумуса в профиле почвы (A + B), % от исходного		Степень 0: <10 Степень 1: 11–20 Степень 2: 21–40 Степень 3: 41–80 Степень 4: >80			
Потери почвенной массы, т/га/год		Степень 0: <5 Степень 1: 6–25 Степень 2: 26–100 Степень 3: 101–200 Степень 4: >200			
Площадь выведенных из землепользования угодий (лишенная растительности на естественных угодьях), % от общей площади		Степень 0: <10 Степень 1: 11–30 Степень 2: 31–50 Степень 3: 51–70 Степень 4: >70			
Площадь обнаженной почвообразующей породы (C) или подстилающей породы (D), % от общей площади		Степень 0: 0–2 Степень 1: 3–5 Степень 2: 6–10 Степень 3: 11–25 Степень 4: >25			
Уничтожение гумусового горизонта		Слабая Средняя Сильная		Сильная: A + B Средняя: Ап(А1) Слабая: до 0.1А	Методика “Критерии оценки экологической обстановки территорий для выявления зон чрезвычайной экологической ситуации и зон экологического бедствия” (утв. Минприроды РФ 30.11.1992).
Потери гумуса в пахотных почвах за период 10 лет, в относительных %		Слабая Средняя Сильная		Сильная: >25 Средняя: 10–25 Слабая: <1.0	
Площадь выведенных из сельскохозяйственного оборота земель вследствие их деградации, % от общей площади сельхозугодий				Сильная: >50 Средняя: 20–50 Слабая: до 5	
Площадь эродированных земель, тыс. га		Слабая Средняя Сильная Очень сильная		Не приводятся	

*Примечание:* \* Письмо Роскомзема от 27.03.1995 № 3-15/582 “О Методических рекомендациях по выявлению деградированных и загрязненных земель” (вместе с “Методическими рекомендациями по выявлению деградированных и загрязненных земель”, утв. Роскомземом 28.12.1994, Минсельхозпродом России 26.01.1995, Минприроды России 15.02.1995); \*\* Приказ Росреестра от 26.06.2015 № П/343 “Об утверждении Порядка организации деятельности и взаимодействия территориальных органов и структурных подразделений Федеральной службы государственной регистрации, кадастра и картографии при осуществлении государственного мониторинга земель”; \*\* Приказ Минсельхоза России от 04.05.2010 № 150 “Об утверждении Порядка государственного учета показателей состояния плодородия земель сельскохозяйственного назначения”. Бюлл. нормативных актов федеральных органов исполнительной власти. № 32.

**Таблица 5.** Несовпадение границ шкал оценки показателя “Суммарный показатель загрязнения почв” в различных нормативно-правовых актах

Показатель	Градация показателя загрязнения почв				
	допустимое	слабое	среднее (умеренно опасная)	сильное (опасное)	очень сильное (чрезвычайно опасное)
Коэффициент концентрации загрязнения почвы*	16		16–32	32–128	Более 128
Суммарный показатель загрязнения (Zc)**	Менее 2	2–8	9–32	32–64	Более 64
Суммарный показатель химического загрязнения (Zc)***	До 0.3			32–128	Более 128

*Примечание:* \* ГОСТ 17.4.3.06-2020. Межгосударственный стандарт. Охрана природы. Почвы. Общие требования к классификации почв по влиянию на них химических загрязняющих веществ (введен в действие Приказом Росстандарта от 06.10.2020 № 748-ст). М.: Стандартиформ, 2020; \*\* Письмо Минприроды России от 27.12.1993 № 04-25/61-5678 “О порядке определения размеров ущерба от загрязнения земель химическими веществами”; \*\*\* Методика “Критерии оценки экологической обстановки территорий для выявления зон чрезвычайной экологической ситуации и зон экологического бедствия” (утв. Минприроды РФ 30.11.1992).

минимизации показателей (менее распространенном подходе) — сравнение состояния объектов с наихудшими в данной местности (Розанов, Зонн, 1981; Куст, 1999).

В данном примере приведены возможные варианты показателей для категории земель сельскохозяйственного назначения. Очевидно, что полный и универсальный список таких показателей для практического использования должен быть существенно расширен, в том числе в зависимости от назначения земель и вида их хозяйственного использования. Вместе с тем, нам представляется, что для других категорий земель и видов угодий целесообразно использовать те же показатели из универсального списка, хотя их набор (состав показателей) может быть изменен и конкретизирован/дифференцирован в зависимости от хозяйственного назначения земель, физико-географических и социально-экономических условий местности/региона.

Первый опыт таких работ показал, что, например, для ООПТ показатели оценки деградации земель могут принципиально отличаться от аналогичных для других категорий земель. На примере оценки НБДЗ Центрально-Черноземного государственного природного биосферного заповедника и Национального парка “Самарская Лука” и их сопредельных территорий нами было установлено, что в условиях ООПТ вклад индикаторов “динамика наземного покрова” и “динамика запасов почвенного органического углерода” в

результаты оценки индикатора ЦУР 15.3.1 ничтожны, и основные изменения за анализируемый период (2000–2018 гг.) связаны с изменением продуктивности, рассчитанной по нормализованному вегетационному индексу NDVI (Куст и др., 2021). Последнее, в свою очередь, отражает серию разнообразных процессов, для которых интерпретация увеличения NDVI как процесс “улучшения” не всегда однозначна. К таковым следует отнести, например, зарастание продуктивных пастбищ и сенокосов древесно-кустарниковой растительностью, зачастую при снижении их биологического разнообразия. Зарастание пашни, также сопровождающееся ростом NDVI, снижает сельскохозяйственный потенциал этих земель. Этот пример показывает, что для более точного установления сбалансированности природных и управляемых экосистем ООПТ и сохранения НБДЗ требуется уточнение используемых индикаторов деградации и введение дополнительных или альтернативных показателей состояния земель. В части ООПТ такими показателями могут быть, например, показатели динамики числа охраняемых видов и численности видов-индикаторов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Развитие международных подходов по оценке деградации земель и новейшая концепция НБДЗ требуют интеграции российских традиционных систем оценки и мониторинга земель в междуна-

**Таблица 6.** Примерный перечень основных показателей для оценки деградации и прогноза состояния земель (на основе анализа системы национальных индикаторов)

Показатель	Уровень применения	Категория земель	Возможность применения	Возможный источник информации	
<b>1. Глобальный индикатор ЦУР 15.3.1 “Доля деградированных земель от всей площади суши” – прямой учет данных</b>					
Площадь эродированных земель	Районный и выше	Для всех категорий	Как составная часть при расчете, верификации и корректировке значений индикатора ЦУР 15.3.1 при условии решения проблемы пересекающихся данных	Минсельхоз, Росреестр	
Площадь захламленных земель					
Площадь заболоченных земель					
Площадь переувлажненных земель					
Площадь подтопленных земель					
Площадь земель, подверженных иным негативным процессам (каменистость, засоление и осолонцевание, физическая деградация и др.)					
Площадь земель, подвергшихся химическому и радиоактивному загрязнению					
Площадь земель, подверженных опустыниванию					
Площадь нарушенных земель		Для всех категорий, кроме сельскохозяйственных		Росреестр	
<b>2. Индикатор НБДЗ “Динамика наземного покрова” – с учетом принципа “полного охвата” по всем индикаторам НБДЗ</b>					
Лесистость территории	Местный и выше	Земли лесного фонда	Как составная часть при расчете, верификации и корректировке значений индикатора НБДЗ	Рослесхоз	
Площадь лесных земель	Районный и выше	Земли сельскохозяйственного назначения		Минсельхоз	
Динамика изменения площадей сельскохозяйственных угодий				Местный и выше	Другие категории земель
Посевные площади сельскохозяйственных культур	Другие категории земель и иные угодья в пределах земель лесфонда и сельхозназначения	Не определен			
Динамика изменения лесопокрытых земель и сельскохозяйственных угодий в пределах иных категорий земель					
Динамика изменения иных угодий					
<b>3. Индикатор НБДЗ “Динамика продуктивности земель” – с учетом принципа “полного охвата” по всем индикаторам НБДЗ</b>					
Средняя урожайность, снижение в % от исходного	Районный и выше	Земли сельскохозяйственного назначения	Как составная часть при расчете, верификации и корректировке значений индикатора НБДЗ	Минсельхоз	
Снижение биоразнообразия		Земли ООПТ		Минприроды	
Скорость деградации наземных экосистем, % площади в год					
Скорость деградации наземных экосистем, % площади в год		Для всех категорий, кроме сельскохозяйственных		Не определен	

Таблица 6. Окончание

Показатель	Уровень применения	Категория земель	Возможность применения	Возможный источник информации
Скорость уменьшения годовой продукции растительности, % в год		Земли лесфонда и сельхозназначения		Минсельхоз, Рослесхоз
Скорость уменьшения годовой продукции растительности, % в год		Земли других категорий		Не определен
4. Индикатор НБДЗ “Динамика запасов почвенного органического углерода” – с учетом принципа “полного охвата” по всем индикаторам НБДЗ				
Динамика содержания гумуса в пахотных почвах за 10 лет	Местный и выше	Земли сельскохозяйственного назначения	Как составная часть при расчете, верификации и корректировке значений индикатора НБДЗ	Минсельхоз
Динамика запасов ПОУ	Местный и выше	Для всех категорий, кроме сельскохозяйственных		Не определен

родные системы, направленные в первую очередь на достижение задачи 15.3 ЦУР ООН (UN, 2015). Вместе с тем корректное применение методологии НБДЗ в России без научной проработки путей адаптации национальных систем к международной не представляется возможным, прежде всего из-за значительного размера территории страны, обуславливающего различия природно-ландшафтных и социально-экономических условий применения подходов НБДЗ. Основные проблемы связаны, как отмечалось ранее (Национальный ..., 2019), с недостаточной проработкой и противоречивостью основных понятий “земля” и “деградация земель”, отсутствием полных аналогов индикаторов НБДЗ в статистических (общенациональной и отраслевых) системах РФ, что определяется в значительной степени несоответствием глобальных (получаемых с использованием международных баз данных) и национальных показателей состояния земель. Кроме того, показатели, используемые в отраслевых руководствах и методиках, также зачастую не совпадают как по набору, так и по используемым количественным и качественным шкалам.

На основании сравнения показателей, используемых разными ведомствами для оценки состояния и мониторинга земель разного назначения, установлены основные расхождения, препятствующие их гармонизации на федеральном уровне. Для преодоления этих расхождений предложены следующие этапы и подходы для интеграции национальной и международной систем оценки деградации земель:

– разработка универсального федерального списка индикаторов и показателей для земель

разного назначения (категорий и угодий) при возможности выбора разного набора индикаторов в зависимости от масштаба (уровня) оценки, типа землепользования (категории земель, вида угодий), а также физико-географических и социально-экономических особенностей оцениваемой территории;

– использование универсальных качественных шкал индикаторов при (в случае необходимости) варьировании количественных значений их показателей (по регионам, отраслям, категориям земель и пр.);

– возможность сохранения отраслевых систем оценки состояния и деградации земель при создании для них общей “надстройки” из индикаторов (в том числе индикаторов-аналогов) ЦУР 15.3.1 и НБДЗ;

– необходимость отражения в национальной системе совокупности динамических индикаторов, как отражающих достижение задачи 15.3 ЦУР по сравнению с установленным базовым периодом, так и индикаторов состояния земель, отражающих их качество по сравнению с наилучшими или наихудшими объектами в данной местности/регионе.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках темы государственного задания Института географии РАН № 0127-2019-0010 “Разработка научных основ устойчивого управления природно-антропогенными системами на основе моделей сбалансированного землепользования”.

**Таблица 7.** Примерный перечень дополнительных показателей для оценки деградации и прогноза состояния земель сельскохозяйственного назначения

Группа показателей	Примеры показателей, которые могут использоваться для оценки динамики и достижения НБДЗ	Примеры показателей для оценки качественного состояния
Ветровая и водная эрозия почв	Скорость и объем потерь почвенной массы Площадь выведенных из сельскохозяйственного оборота земель вследствие их деградации Площадь земель, подверженных линейной эрозии Площадь подвижных песков	Мощность почвенного профиля (А + В) Расчлененность территории оврагами Мощность дефляционного наноса неплодородного слоя
Изменение запасов ПОУ	Запас гумуса в профиле почвы	Мощность гумусового (пахотного) горизонта
Негативные изменения водного режима	Превышение уровня грунтовых вод, % от критического значения Площадь подтопленных или заболоченных территорий	Поднятие уровня минерализованных или пресных вод Продолжительность затопления Коэффициент фильтрации
Засоление, осолонцевание почв	Площадь засоленных почв, % в год Количественные показатели токсичной щелочности почв, содержания легкорастворимых солей, доли обменного натрия	Степень засоления/солонцеватости почвы Разновидности солончаков Структура почвенного покрова Типы растительного покрова
Уплотнение почв	Плотность и порозность почвы	Структура почвы
Химическое загрязнение	Превышение ПДК химических веществ Суммарный показатель химического загрязнения	Проективное покрытие
Радиоактивное загрязнение	Степень радиоактивного загрязнения	Мощность экспозиционной дозы на уровне 1 м от поверхности почвы
Снижение продуктивности наземных экосистем	Урожайность/валовый сбор сельскохозяйственных культур, плодов, ягод и винограда Уменьшение численности (плотности) охотничье-промысловых видов животных Продуктивность пастбищной растительности Скорость роста площади деградированных пастбищ	Проективное покрытие пастбищной растительности Плотность популяции вида-индикатора антропогенной нагрузки, % Виды севооборотов
Снижение плодородия почв	Содержание элементов минерального питания растений, органического вещества почвы	Проективное покрытие



## FUNDING

The work was carried out within the framework of state-ordered research theme of the Institute of Geography RAS no. 0127-2019-0010 “Development of Scientific Foundations for Sustainable Management of Natural-Anthropogenic Systems Based on Models of Balanced Land Management.”

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Беляева М.В., Андреева О.В., Куст Г.С., Лобковский В.А.* Опыт оценки динамики деградации земель юга Европейской части России с использованием методологии нейтрального баланса деградации земель // Экосистемы: экология и динамика. 2020. Т. 4. № 3. С. 145–165.
- Куст Г.С.* Опустынивание: принципы эколого-генетической оценки и картографирования. М.: Институт почвоведения МГУ–РАН, 1999. 362 с.
- Куст Г.С., Андреева О.В., Лобковский В.А.* Нейтральный баланс деградации земель – новейший подход для принятия решений в области землепользования и земельной политики // Проблемы постсоветского пространства. 2018. Т. 5. № 4. С. 369–389. <https://doi.org/10.24975/2313-8920-2018-5-4-369-389>
- Куст Г.С., Андреева О.В., Лобковский В.А., Славко В.Д.* Проблемы землепользования и деградации земель в контексте Программы ЮНЕСКО “Человек и Биосфера” // Вопросы географии. Человек и биосфера. 2021. Т. 152. С. 222–252.
- Лобковский В.А., Куст Г.С., Андреева О.В.* Методические подходы к оценке временного интервала для установления базовой линии в целях сравнительной оценки динамики деградации земель // Проблемы региональной экологии. 2020. № 4. С. 48–56. <https://doi.org/10.24411/1728-323X-2020-14048>
- Макаров О.А., Яковлев А.С., Красильников П.В., Бондаренко Е.В.* Экологическое нормирование качества почв как основа для оценки их деградации // Проблемы агрохимии и экологии. 2014. № 4. С. 40–41.
- Национальный доклад “Глобальный климат и почвенный покров России: опустынивание и деградация земель, институциональные, инфраструктурные, технологические меры адаптации (сельское и лесное хозяйство)”. М.: ООО “Изд-во МБА”, 2019. Т. 2. 476 с.
- Птичников А.В., Карелин Д.В., Котляков В.М. и др.* Применимость международных индикаторов оценки нейтрального баланса деградации земель к бореальным лесам России // ДАН. 2019. Т. 489. № 2. С. 195–198. <https://doi.org/10.31857/S0869-56524892195-198>
- Розанов Б.Г., Зонн И.С.* План действий по борьбе с опустыниванием в СССР: оценка, мониторинг, предупреждение и борьба с ним // Проблемы освоения пустынь. 1981. № 6. С. 22–31.
- Andreeva O.V., Kust G.S.* Land Assessment in Russia Based on the Concept of Land Degradation Neutrality // Reg. Res. Russ. 2020. Vol. 10. № 4. С. 593–602. <https://doi.org/10.1134/S2079970520040127>
- Kust G., Andreeva O., Lobkovskiy V., Telnova N.* Uncertainties and policy challenges in implementing Land Degradation Neutrality in Russia // Environ. Sci. & Policy. 2018. Vol. 89. P. 348–356. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2018.08.010>
- Kuderina T.M., Suslova S.B., Lunin V.N., et al.* Atmospheric Moisture as a Factor of Land Degradation Neutrality in Forest–Steppe Landscapes // Arid Ecosys. 2020. Vol. 10. P. 156–160. <https://doi.org/10.1134/S2079096120020079>
- Kust G.S.* To the treatment and interpretation of the “desertification” term in Russia // Arid Ecosys. 2011. Vol. 1. № 4. P. 299–304.
- Orr B.J., Cowie A.L., Castillo Sanchez V.M., et al.* Scientific Conceptual Framework for Land Degradation Neutrality. A Report of the Science-Policy Interface. United Nations Convention to Combat Desertification (UNCCD). Bonn, Germany, 2017. 129 p.
- Shcherba T.E., Kust G.S., Smagin A.V., et al.* Diagnostics of Desertification with the Use of Water Retention Curve of Soils // Arid Ecosystems. 2016. Vol. 6. P. 249–259. <https://doi.org/10.1134/S2079096116040090>
- Tsymbarovich P., Kust G., Kumani M., Golosov V., Andreeva O.* Soil erosion: An important indicator for the assessment of land degradation neutrality in Russia // Int. Soil and Water Conserv. Res. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2020.06.002>
- UN, 2015. United Nations. A/RES/70/1. General Assembly. Resolution adopted by the General Assembly. Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. 35 p. [http://www.un.org/ga/search/view\\_doc.asp?symbol=A/RES/70/1&Lang=E](http://www.un.org/ga/search/view_doc.asp?symbol=A/RES/70/1&Lang=E)
- UN, 2017. United Nations. A/RES/70/1. General Assembly. Resolution adopted by the General Assembly. Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. 35 p. [http://www.un.org/ga/search/view\\_doc.asp?symbol=A/RES/70/1&Lang=E](http://www.un.org/ga/search/view_doc.asp?symbol=A/RES/70/1&Lang=E)
- UNCCD, 2016. Land Degradation Neutrality: The Target Setting Programme. 20 p.
- UNSD, 2016. E/CN.3/2016/2/Rev.1. Report of the Inter-Agency Expert Group on Indicators of the achievement of the Sustainable Development Goals. <http://unsdsn.org/wp-content/uploads/2015/03/150320-SDSN-Indicator-Report.pdf>

## Using National System of Land Monitoring for Assessment of Land Degradation Neutrality in Russia

V. A. Lobkovskiy<sup>1</sup>, \*, O. V. Andreeva<sup>1</sup>, and G. S. Kust<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

\*e-mail: v.a.lobkovskiy@igras.ru

Actions to assess and combat desertification at the international level are currently associated primarily with the implementation of the modern concept of land degradation neutrality (LDN) in the framework of achieving Target 15.3 of the UN Sustainable Development Goals (SDGs). It was found that in the current Russian system of statistical land registration, there are no indicators for monitoring land degradation, except agricultural lands, which could correspond to the LDN indicators. The paper shows the possibilities of integrating land quality indicators and indexes used in Russia into the global land assessment system. It is proposed to streamline the data of various departments through a common agreed consistent system based on LDN indicators, for which a set of requirements is proposed. A conceptual diagram of the formation and a hierarchical structure for a system of land degradation indicators in Russia is proposed, including, on the one hand, dynamic indicators characterizing the LDN achievement, and on the other hand, indicators of the land state characterizing the quality of lands (in terms of risks and results of degradation) in relation to their target objectives use within the respective categories. Based on these approaches, preliminary analysis and selection of indicators from various departmental systems were carried out for integration into the global assessment system based on the LDN methodology. Further ways of integrating national and international systems for assessing land degradation are presented as follows: (a) development of a universal federal list of indicators and indicators for lands of various usage (categories and types); (b) the use of universal qualitative scales of indicators when varying the quantitative values of their indexes (by region, industry, land category, etc.); (c) the use of comparative scales of land quality in relation to both the best (maximization of indicators) and/or worst (minimization of indicators) objects in a given area/region.

*Keywords:* land degradation, risk of degradation, land degradation neutrality, system of indicators, indicators of land degradation, baseline, sustainable development

### REFERENCES

- Andreeva O.V., Kust G.S. Land assessment in Russia based on the concept of Land Degradation Neutrality. *Reg. Res. Russ.*, 2020, vol. 10, no. 4, pp. 593–602. <https://doi.org/10.1134/S2079970520040127>
- Belyaeva M.V., Andreeva O.V., Kust G.S., Lobkovskiy V.A. Experience in assessment of land degradation dynamics of the south of European part of Russia using the methodology of Land Degradation Neutrality. *Ekosistemy. Ekol. i Dinamika*, 2020, vol. 4, no. 3, pp. 145–165. (In Russ.). <https://doi.org/10.24411/1993-3916-2021-10135>
- Kuderina T.M., Suslova S.B., Lunin V.N., Kudikov A.V. Atmospheric moisture as a factor of land degradation neutrality in forest–steppe landscapes. *Arid Ecosyst.*, 2020, vol. 10, pp. 156–160. <https://doi.org/10.1134/S2079096120020079>
- Kust G., Andreeva O., Lobkovskiy V., Telnova N. Uncertainties and policy challenges in implementing Land Degradation Neutrality in Russia. *Environ. Sci. Policy*, 2018, vol. 89, pp. 348–356. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2018.08.010>
- Kust G.S. *Opustynivanie: printsipy ekologo-geneticheskoi otsenki i kartografirovaniya* [Desertification: Principles of Ecological-Genetic Assessment and Mapping]. Moscow: Inst. Pochvoved. MGU-RAN, 1999. 362 p.
- Kust G.S. To the treatment and interpretation of the “desertification” term in Russia. *Arid Ecosyst.*, 2011, vol. 1, no. 4, pp. 299–304. <https://doi.org/10.1134/S2079096111040160>
- Kust G.S., Andreeva O.V., Lobkovskiy V.A., Slavko V.D. Land use and land degradation issues in the context of the UNESCO “Man&Biosphere” Programme. In *Vo-prosy geografii* [Problems of Geography]. Vol. 152: *Chelovek i biosfera* [Man and Biosphere]. Kotlyakov V.M., Badenkov Yu.P., Eds. Moscow: Media-Press, 2021, pp. 222–252. (In Russ.).
- Kust G.S., Andreeva O.V., Lobkovskiy V.A. Land Degradation Neutrality – the modern approach for land management and policy-making. *Post-Soviet Issues*, 2018, vol. 5 (4), pp. 369–389. (In Russ.). <https://doi.org/10.24975/2313-8920-2018-5-4-369-389>
- Lobkovskiy V.A., Kust G.S., Andreeva O.V. Methodological approaches to estimating the time interval for establishing a baseline for comparative assessment of land degradation dynamics. *Probl. Region. Ekol.*, 2020, no. 4, pp. 48–56. (In Russ.). <https://doi.org/10.24411/1728-323X-2020-14048>
- Makarov O.A., Yakovlev A.S., Krasil'nikov P.V., Bondarenko E.V. Environmental regulation of soil quality as a basis for the assessment of its degradation. *Probl. Agrokhim. Ekol.*, 2014, no. 4, pp. 40–41. (In Russ.).
- Natsional'nyi doklad “Global'nyi klimat i pochvennyi pokrov Rossii: opustynivanie i degradatsiya zemel”, institutsional'nye, infrastrukturnye, tekhnologicheskie mery adaptatsii (sel'skoe i lesnoe khozyaistvo)”* [National Report “Global Climate and Land Cover in Russia: Desertification and Land Degradation, Institutional, Infrastructural, and Technological Adaptation Measures (Agriculture and Forestry)]. Moscow: MBA Publ., 2019, vol. 2. 476 p.

- Orr B.J., Cowie A.L., Castillo Sanchez V.M. et al. *Scientific Conceptual Framework for Land Degradation Neutrality. A Report of the Science-Policy Interface*. Bonn: UNCCD, 2017. 129 p.
- Ptichnikov A.V., Karelin D.V., Kotlyakov V.M. et al. Indicators in estimation of land degradation neutrality for Russian boreal forests. *Dokl. Earth Sci.*, 2019, vol. 489, pp. 1345–1347.  
<https://doi.org/10.1134/S1028334X19110151>
- Rozanov B.G., Zonn I.S. Action plan to combat desertification in the USSR: assessment, monitoring, prevention, and control. *Probl. Osvoeniya Pustyn'*, 1981, no. 6, pp. 22–31. (In Russ.).
- Shcherba T.E., Kust G.S., Smagin A.V. et al. Diagnostics of desertification with the use of water retention curve of soils. *Arid Ecosyst.*, 2016, vol. 6, pp. 249–259.  
<https://doi.org/10.1134/S2079096116040090>
- Tsymbarovich P., Kust G., Kumani M., Golosov V., Andreeva O. Soil erosion: An important indicator for the assessment of land degradation neutrality in Russia. *Int. Soil Water Conserv. Res.*, 2020, vol. 8, no. 4, pp. 418–429.  
<https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2020.06.002>
- UN. A/RES/70/1. General Assembly. Resolution adopted by the General Assembly. Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. United Nations, 2015. 35 p.  
Available at: [http://www.un.org/ga/search/view\\_doc.asp?symbol=A/RES/70/1&Lang=E](http://www.un.org/ga/search/view_doc.asp?symbol=A/RES/70/1&Lang=E)
- UN. A/RES/70/1. General Assembly. Resolution adopted by the General Assembly. Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. United Nations, 2017. 35 p.  
Available at: [http://www.un.org/ga/search/view\\_doc.asp?symbol=A/RES/70/1&Lang=E](http://www.un.org/ga/search/view_doc.asp?symbol=A/RES/70/1&Lang=E)
- UNCCD, Land Degradation Neutrality: The Target Setting Programme. 2016. 20 p.
- UNSD, E/CN.3/2016/2/Rev.1. Report of the Inter-Agency Expert Group on Indicators of the achievement of the Sustainable Development Goals. 2016. Available at: <http://unsdsn.org/wp-content/uploads/2015/03/150320-SDSN-Indicator-Report.pdf>

## ПРОБЛЕМЫ ДЕГРАДАЦИИ ЗЕМЕЛЬ И УСТОЙЧИВОГО ЗЕМЛЕПОЛЬЗОВАНИЯ

УДК 504.53:504.54:504.38:633.1

### ПРОБЛЕМЫ АДАПТАЦИИ СТЕПНОГО ЗЕМЛЕПОЛЬЗОВАНИЯ К АНТРОПОГЕННЫМ И КЛИМАТИЧЕСКИМ ИЗМЕНЕНИЯМ (НА ПРИМЕРЕ ОРЕНБУРГСКОЙ ОБЛАСТИ)

© 2022 г. Ю. А. Гулянов<sup>а</sup>, А. А. Чибилёв (мл.)<sup>а, \*</sup>, А. А. Чибилёв<sup>а</sup>, С. В. Левыкин<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Институт степи Оренбургского ФИЦ УрО РАН, Оренбург, Россия

\*e-mail: orensteppe@mail.ru

Поступила в редакцию 07.06.2021 г.

После доработки 10.09.2021 г.

Принята к публикации 12.10.2021 г.

Среди субъектов степной зоны Российской Федерации Оренбургская область – типично степной регион с развитым зерновым производством. Практикуемые здесь на протяжении длительного времени традиционные почвозатратные технологии, ориентированные преимущественно на мобилизацию природного почвенного плодородия, привели к повсеместной деградации степных угодий, иссушению территории, снижению продуктивности агроценозов и кризисному сокращению ландшафтного и биологического разнообразия. Цель исследований заключалась в анализе современных вызовов устойчивому степному землепользованию, выявлении исторических, технологических и климатических предпосылок снижения качества земель и продуктивности сельскохозяйственных угодий (на примере Оренбургской области), разработке и научном обосновании подходов к адаптации степного землепользования к современным почвенным и климатическим изменениям. Используются размещенные в свободном доступе электронные материалы о климатических ресурсах, результатах хозяйственной деятельности, а также материалы экспедиционных исследований. Анализ результативности полеводства, выявление климатических тенденций и определение их связи проведены в соответствии с природно-сельскохозяйственным районированием и агроэкологической группировкой земель. Подтверждено сохранение устойчивой почвозатратной направленности современной структуры сельскохозяйственных угодий. Выявлена крайне неблагоприятная динамика гидротермических условий, имеющих особенно выраженный засушливый тренд в Заволжской и Казахстанской провинциях степной и сухостепной зон области, сопровождающийся снижением продуктивности фитомассы искусственных и природных ценозов. Установлена сильная прямая связь продуктивности полевых культур (яровой пшеницы) с количеством осадков и гидротермическим коэффициентом Селянинова в период вегетации и обратная связь с суммой активных температур. Систематизированы проблемы оптимизации структуры земельных угодий юридического, землеустроительного и технологического характера, препятствующие официальному изменению их статуса. Предложено внедрение адаптивного стратегического подхода. Проанализированы научные теории оптимизации степного землепользования с использованием адаптивно-ландшафтных систем земледелия, оценена вероятность их внедрения в современных условиях. Обосновано применение природоподобных земледельческих технологий, способствующих более эффективному использованию природных ресурсов и шадящему антропогенному воздействию на прилегающие ландшафты.

*Ключевые слова:* деградация степных угодий, сокращение ландшафтного и биологического разнообразия, снижение продуктивности агроценозов, оптимизация степного землепользования, адаптивная поляризация земельных угодий, адаптивно-ландшафтные системы земледелия

DOI: 10.31857/S258755662201006X

#### ВВЕДЕНИЕ

Среди субъектов степной зоны России Оренбургская область является типично степным регионом, стабильно поставляющим на российский рынок продукцию агропромышленного комплекса. Земельные ресурсы региона преимущественно угодьями сельскохозяйственного назначения, занимающими около

11.0 млн га, или 88.2% территории. Обеспеченность сельскохозяйственными угодьями значительно превышает общероссийский показатель и составляет 5.5 га на 1 человека.

В структуре земель сельскохозяйственного назначения наибольшую долю составляют пашня и пастбища (около 90.0%), основные массивы которых располагаются в центральных и восточных

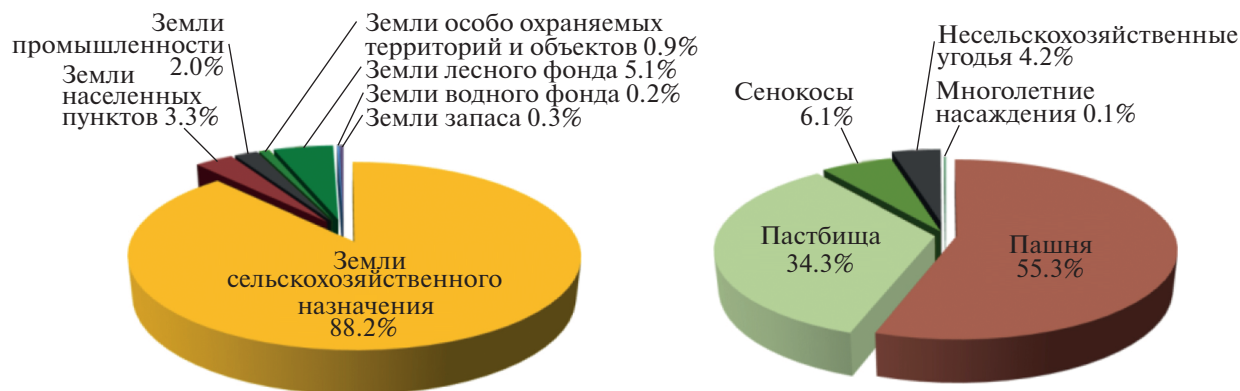


Рис. 1. Структура земельного фонда (а) и земель сельскохозяйственного назначения (б) Оренбургской области на 01.01.2020 г.

районах области. В более влагообеспеченных западных районах освоены наибольшие площади сенокосных угодий, приуроченных в основном к долинам рек Урал, Сакмара, Самара и их основным притокам. Площадь земель водного фонда сравнительно невелика и составляет 21.5 тыс. га<sup>1</sup>, немногим более 5.0% территории занято лесным фондом (630.7 тыс. га). Под земли населенных пунктов отведено 406.0 тыс. га, из которых более 35.0% (144.3 тыс. га) находится под городами. Более 250.0 тыс. га занято предприятиями промышленности, энергетики, транспорта, связи, обороны и иного специального назначения. На площади 268.1 тыс. га организовано 336 особо охраняемых природных территорий (ООПТ) (рис. 1).

Земельные ресурсы области являются ее основным богатством, их рациональное и эффективное использование, направленное на удовлетворение жизненных потребностей населения при сохранении безопасной среды обитания и биологического разнообразия для будущих поколений, относятся к числу первоочередных приоритетов стратегического развития.

#### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ: СОВРЕМЕННЫЕ ВЫЗОВЫ УСТОЙЧИВОМУ СТЕПНОМУ ЗЕМЛЕПОЛЬЗОВАНИЮ

Земельные ресурсы степного Оренбуржья многим поколениям промышленников и сельхозтоваропроизводителей представлялись неисчерпаемыми, причем без особых затрат на сохранение и воспроизводство почвенного плодородия, защиту почв от разрушительных степных

ветров, сохранение биологического разнообразия. Бессистемный выпас, многократно превышающий допустимые нагрузки на пастбища, отвальная обработка почвы, особенно в условиях повышающейся засушливости климата, пренебрежение законами земледелия и традиционная надежда на случайные урожаи стали причиной снижения запасов гумуса, уменьшения почвенно-биологической активности, способствовали развитию эрозии почвы и привели к ее значительной пестроте. В процессе хозяйственной деятельности большие территории были отведены под карьеры, выемки, насыпи, отвалы, что при полном отсутствии или безответственной рекультивации привело к нарушению земель, существенно снизило их пригодность для дальнейшего использования<sup>2</sup>.

Особенно сильно устойчивость и продуктивность степных угодий была подорвана в XX в., в период так называемой целинной кампании 1954–1963 гг., характеризовавшейся многократным превышением разумных пределов подъема целинных земель. Наряду с научно обоснованной площадью распашки (11–13 млн га) черноземных почв на востоке степной зоны России (по прогнозным проектам академиков Н.И. Вавилова, Н.М. Тулайкова и других авторитетных ученых) в обработку были вовлечены десятки миллионов гектаров потенциально низкопродуктивных земель (Рычков, 2013).

Освоение целинных земель позволяло быстро увеличить производство зерна для истощавшегося по вольному хлебу в военный и послевоенный период населения СССР. При такой безусловной мотивации и патриотическом настрое первоцелинников, всячески поощряемом со сторо-

<sup>1</sup> Государственный (национальный) доклад о состоянии и использовании земель в Российской Федерации в 2019 году. <https://rosreestr.gov.ru/site/activity/-gosudarstvennyy-nationalnyy-doklad-o-sostoyanii-i-ispolzovanii-zemel-rossiyskoy-federatsii/> (дата обращения 20.03.2021).

<sup>2</sup> Территориальное планирование Оренбургской области. <https://minstroyoren.orb.ru/activity/1558/> (дата обращения 15.03.2021).

ны руководства страны, было достигнуто существенное перевыполнение плановых показателей. В итоге первоначальный план целинной кампании, ориентированный на подъем 13–15 млн га, завершился вовлечением в обработку еще около 30 млн га. Как впоследствии выяснилось, широкомасштабное вовлечение в пашню степных угодий не стало гарантом стабильности зернового производства, прежде всего по причине стремительной деградации и снижения плодородия малопригодных для обработки почв.

За последние 30 лет (1990–2020 гг.) в РФ произошли существенные изменения в структуре сельскохозяйственных угодий, связанные с рыночными преобразованиями в земельных отношениях и развитием многоукладных способов хозяйствования на земле. В 1990–2010 гг. они выражались в стихийном выведении из обработки истощенных и неустойчивых пахотных угодий и увеличении площади залежных земель. В последнее же десятилетие наблюдается процесс обратного вовлечения залежей в обработку, и площадь пашни снова приближается к размерам 1990 г. (Чибилёв (мл) и др., 2018).

Интенсивное вовлечение степного пространства в сельскохозяйственный оборот стало причиной практически полной утраты целинных зональных степей на полнопрофильных суглинистых почвах, в первую очередь на водораздельных и придолинных плакорах, на надпойменных террасах, создало угрозу поддержания стабильности биологических систем и биоразнообразия произрастающих и обитающих здесь видов растений и животных, значительная часть которых (дрофа, стрепет, красавка, степной орел и др.) занесена в Красную книгу Российской Федерации<sup>3</sup>.

В некоторой степени разряжает ситуацию формирование в Южном Предуралье и в Зауралье на залежных землях площадью 0.4–0.5 млн га вторичных степей с набором титульных красно-книжных видов (прежде всего птиц и животных), сохранение которых при правильном природоохранном подходе может способствовать некоторой стабилизации их численности.

Несмотря на приоритет лесных объектов при создании ООПТ в степной зоне, обострились проблемы сохранения старовозрастных естественных насаждений, количество и площадь которых в условиях климатических изменений стремительно сокращаются, а их возобновлению препятствуют антропогенные факторы. Начиная с 1960-х годов, наблюдается обеднение ресурсов наиболее массовых охотничьих видов дичи, в том числе водоплавающей, и существенно сокращаются рыбные ресурсы (Левыкин и др., 2020).

<sup>3</sup> Красная Книга России. <https://redbookrf.ru/> (дата обращения 25.05.2021).

Следует отметить, что при всем многообразии жизнеобеспечивающих функций степей, направленных на поддержание биологического разнообразия и экологического баланса экосистемы, регионы степной зоны России являются основными производителями продовольственного зерна пшеницы. Здесь собирается до 12.6–17.5 млн т зерна в год, или 60.0–77.6% от общего валового сбора. Из них 0.7–1.3 млн т, или 5.5–7.7%, составляет зерно, собранное в Оренбургской области (Gulyanov et al., 2021). Данное обстоятельство свидетельствует о высокой актуальности весомых и стабильных оренбургских урожаев в поддержании продовольственной безопасности населения, особенно в условиях изменений климата (Шеврина, Корабейникова, 2020), принявших глобальный характер (Fawaz and Soliman, 2016; Harrison et al., 2020; Sommer et al., 2010).

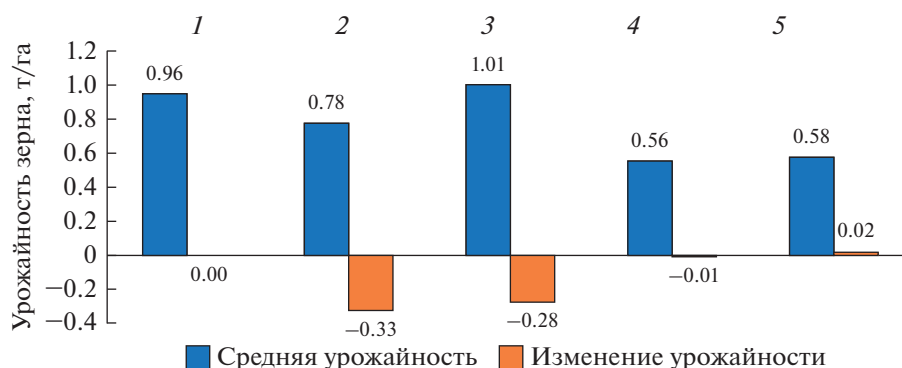
Как свидетельствуют результаты анализа урожайности зерна яровой пшеницы по природно-сельскохозяйственным провинциям Оренбургской области (2008–2019 гг.), традиционные подходы в земледелии при сложившемся уровне плодородия в условиях современных климатических тенденций не способствуют росту урожайности. В отдельных же природно-сельскохозяйственных провинциях наблюдается ее заметное снижение (рис. 2).

Наиболее существенное снижение урожайности (на 0.28–0.33 т/га) отмечается в Казахстанской и Заволжской провинциях степной зоны. В Предуральской провинции лесостепной зоны выявлен ее практически нулевой тренд. В Заволжской и Казахстанской провинциях сухостепной зоны, отличающихся наименьшей степенью реализации биоклиматического потенциала (БКП) (30–35%), снижение гидротермического коэффициента Селянинова (далее ГТК) до 0.54 мм/°C позволяет поддерживать урожайность зерна только на минимальном для области уровне (0.56–0.58 т/га).

Результаты корреляционно-регрессионного анализа указывают на прямую зависимость урожайности зерна яровой пшеницы от уровня почвенного плодородия, количества осадков и ГТК в период вегетации и обратную зависимость от сумм активных температур (Гулянов, 2021).

Исходя из вышеизложенного, в условиях крайне обострившихся экологических проблем, порожденных длительной природозатратной деятельностью человека и ощутимыми климатическими изменениями, многократно возрастает актуальность адаптации к ним современного степного землепользования, а ее результаты представляют несомненный практический интерес.

Цель исследований заключалась в актуализации вызовов устойчивому степному землепользованию, выявлении исторических, технологиче-



**Рис. 2.** Средняя урожайность и изменение урожайности зерна яровой пшеницы по природно-сельскохозяйственным провинциям Оренбургской области, 2008–2019 гг., т/га (1 – Предуральская лесостепной зоны, 2 – Заволжская степной зоны, 3 – Казахстанская степной зоны, 4 – Заволжская сухостепной зоны, 5 – Казахстанская сухостепной зоны).

ских и климатических предпосылок снижения качества земель и продуктивности сельскохозяйственных угодий (на примере Оренбургской области), разработке и научном обосновании подходов к адаптации степного землепользования к современным почвенным и климатическим изменениям.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве источника данных использовали размещенные в свободном доступе электронные ресурсы “ЕМИСС. Государственная статистика”<sup>4</sup>, “Регионы России. Социально-экономические показатели”<sup>5</sup>, “Погода и климат”<sup>6</sup>, “Осадки и температура”<sup>7</sup>, материалы экспедиционных исследований. Анализ результативности полеводства (2008–2019 гг.), выявление современных климатических тенденций (1990–2020 гг.) и определение их связи проведены в соответствии с природно-сельскохозяйственным районированием Оренбургской области и агроэкологической группировкой земель (Система ..., 1999). Статистическая обработка цифрового материала осуществлена с применением стандартных методов корреляционного и регрессионного анализа (Доспехов, 1985).

<sup>4</sup> ЕМИСС. Государственная статистика. Урожайность сельскохозяйственных культур (в расчете на убранную площадь). <https://www.fedstat.ru/indicator/31533> (дата обращения 22.01.2021).

<sup>5</sup> Регионы России. Социально-экономические показатели. 2020. [https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/fimgAF33/Region\\_Pokaz\\_-2020.pdf](https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/fimgAF33/Region_Pokaz_-2020.pdf) (дата обращения 11.05.2021).

<sup>6</sup> Погода и климат. <http://www.pogodaiklimat.ru/history.php> (дата обращения 15.03.2021).

<sup>7</sup> Осадки и температура. <http://aisori-m.meteo.ru/waisori/select.xhtml> (дата обращения 10.02.2021).

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

### *Исторические, технологические и климатические предпосылки снижения качества земель и продуктивности сельскохозяйственных угодий*

**Антропогенные предпосылки.** Как свидетельствуют результаты широкомасштабных научных исследований, проведенных различными научными и учебными центрами, основными причинами деградации земельных угодий степных регионов России за истекшее столетие стало их повсеместное истощение вследствие преимущественно экстенсивного земледелия и значительного превышения антропогенной нагрузки на неполнопрофильные, склоновые и малоустойчивые к эрозионным проявлениям почвы (Кирушин, 2019).

В Оренбургской области наиболее остро проблема эрозии и системных потерь органики обозначилась в послецелинный период как результат вовлечения в пашню около 0.5 млн га (из 1.8 млн га распаханых земель в Предуралье) почв с укороченным профилем, карбонатных, засоленных, быстро перешедших в разряд сильно эродированных. В Зауралье из 1 млн га распаханых за целинную компанию земель более 0.3 млн га представляли собой солонцово-степные комплексы с маломощными, карбонатными, солонцеватыми легкими почвами. В пашню также было вовлечено около 120 тыс. га песчаных и супесчаных почв, 600 тыс. га солонцов и 500 тыс. га наиболее эрозионно-опасных, а в целом свыше 1.2 млн га малопродуктивных почв (Климентьев, 2000).

Распашка малопригодных для земледелия территорий при экстенсивном использовании сопровождалась потерей природного плодородия почв, которое, по разным оценкам, составило от 30 до 50% запасов гумуса, а площадь земель, под-

**Таблица 1.** Особенности выпадения атмосферных осадков по природно-сельскохозяйственным провинциям Оренбургской области, 1990–2020 гг.

Провинция	Атмосферные осадки, средние за период, мм					
	за год <i>CV</i>	период активной вегетации			неактивный период	
		среднее (%) <i>CV</i>	Max (год)	Min (год)	среднее (%) <i>CV</i>	Max Min
Предуральская лесостепной зоны	<u>450</u> 15.5	<u>228 (50.7)</u> 26.5	<u>319</u> (2006)	<u>100</u> (2010)	<u>222 (49.3)</u> 21.1	<u>300</u> 144
Заволжская степной зоны	<u>359</u> 25.1	<u>198 (55.2)</u> 36.7	<u>314</u> (2002)	<u>72</u> (1998)	<u>161 (44.8)</u> 25.8	<u>250</u> 92
Казахстанская степной зоны	<u>285</u> 30.5	<u>170 (59.6)</u> 47.0	<u>330</u> (1993)	<u>75</u> (2014)	<u>115 (40.4)</u> 23.1	<u>162</u> 66
Заволжская сухостепной зоны	<u>327</u> 28.9	<u>177(54.1)</u> 44.1	<u>332</u> (2007)	<u>36</u> (2014)	<u>150 (45.9)</u> 22.3	<u>245</u> 105
Казахстанская сухостепной зоны	<u>305</u> 21.9	<u>163 (53.4)</u> 30.8	<u>284</u> (2000)	<u>91</u> (1998)	<u>142 (46.6)</u> 24.1	<u>212</u> 79

Примечание. *CV* (здесь и далее) – коэффициент вариации (coefficient of variation), %.

верженных дефляции, увеличилась в несколько раз (Русанов, Кононов, 1998).

В результате широкомасштабного освоения степного пространства уже к концу XX в. прирост площадей эродированных земель составил более 1% в год. С 1955 по 1984 г. содержание гумуса в обыкновенных черноземах снизилось в среднем на 3.1 п. п. (процентных пункта) и на 1.0 п. п. – в темно-каштановых почвах (Климентьев, 2000). К концу второго тысячелетия площадь низкопродуктивной пашни в Оренбургской области, подлежащей первоочередной консервации, оценивалась в 0.6 млн га и еще 0.7 млн га были отнесены к условно пахотнопригодным почвам (Русанов, Кононов, 1998).

В современной земледелии Оренбургской области, на фоне высокого насыщения посевных площадей зерновыми культурами (до 65%), при практически полном отказе от внесения органических удобрений и мизерном применении минеральных удобрений, формируются достаточно серьезные риски дальнейшей деградации почвы и снижения полноты реализации биоклиматического потенциала. Вызывает особую тревогу ситуация с кормовыми культурами, площадь которых неуклонно сокращается при одновременном расширении почвоутомительных коммерческих монокультур, в особенности подсолнечника, занимающего в отдельные годы до 1.0 млн га.

Существенное обеднение зональных почв в условиях негативных климатических и технологических тенденций становится одной из главных причин, обостряющих нестабильность земледелия, приводит к существенному варьированию валовых сборов ввиду практически ежегодного списания значительных площадей, особенно зерновых культур. Разница между площадью уборки и площадью посева в отдельные годы может превышать 1.0 млн га (из 2.7–3.0 млн засеянных), а в особенно дефицитные по увлажнению годы – 1.7 млн га (2010 г.). Как итог, средняя сохранность посевов зерновых и зернобобовых культур (2008–2019 гг.) составляет около 80.0%, а площадь не убираемых ввиду отсутствия экономической целесообразности полей – более 550 тыс. га в год.

**Климатические предпосылки.** Изучение метеорологических показателей по природно-сельскохозяйственным провинциям Оренбургской области за истекший 31-летний период подтвердило их значительную временную и пространственную вариабельность (табл. 1).

При общей напряженности с обеспеченностью территории области атмосферными осадками наибольшим их количеством характеризуется Предуральская провинция лесостепной зоны как по среднегодовым значениям, так и по показателям периода активной вегетации (период со среднесуточной температурой воздуха выше 10°C).



**Таблица 2.** Гидротермическая характеристика природно-сельскохозяйственных провинций Оренбургской области, 1990–2020 гг.

Провинция	Температура воздуха, средняя за период (месяцы), °С				ГТК Селянинова, мм/°С	
	I–XII <i>CV</i>	V–VIII <i>CV</i>	сумма активных температур		среднее <i>CV</i>	Max Min
			среднее <i>CV</i>	Max Min		
Предуральская лесостепной зоны	$\frac{4.2}{20.6}$	$\frac{18.0}{7.3}$	$\frac{2762}{8.1}$	$\frac{3389}{2415}$	$\frac{0.82}{29.7}$	$\frac{1.14}{0.32}$
Заволжская степной зоны	$\frac{5.7}{17.7}$	$\frac{19.9}{7.6}$	$\frac{3174}{8.3}$	$\frac{3925}{2653}$	$\frac{0.63}{47.7}$	$\frac{1.09}{0.23}$
Казахстанская степной зоны	$\frac{3.4}{27.2}$	$\frac{18.0}{7.2}$	$\frac{2740}{8.5}$	$\frac{3437}{2356}$	$\frac{0.63}{52.7}$	$\frac{1.15}{0.26}$
Заволжская сухостепной зоны	$\frac{5.7}{17.7}$	$\frac{20.1}{7.8}$	$\frac{3216}{8.6}$	$\frac{3955}{2690}$	$\frac{0.54}{49.3}$	$\frac{1.13}{0.11}$
Казахстанская сухостепной зоны	$\frac{4.5}{22.2}$	$\frac{19.4}{7.2}$	$\frac{3036}{8.7}$	$\frac{3855}{2516}$	$\frac{0.54}{36.7}$	$\frac{0.90}{0.28}$

Наименьшее их среднегодовое количество (285–305 мм) в анализируемый период отмечалось в Казахстанских провинциях степной и лесостепной зон, с наибольшей нестабильностью в степной зоне. Здесь же, а также в Заволжской провинции сухостепной зоны, отмечено самое низкое количество осадков периода активной вегетации, составившее 163–177 мм. Самое минимальное выпадение осадков в холодный период года (115–142 мм) наблюдалось также в Казахстанских провинциях степной и лесостепной зон, с высоким коэффициентом вариации ( $CV = 23.1–24.1$ ).

При примерно равном распределении осадков по сезонам года в природно-сельскохозяйственных провинциях области самый выраженный уклон в сторону теплого периода отмечен в Заволжской и Казахстанской провинциях степной зоны ( $CV = 55.2–59.6\%$ ). Наибольший размах вариации осадков периода активной вегетации, составивший 296 мм, наблюдался в Заволжской провинции сухостепной зоны. В Казахстанской и Заволжской провинциях степной зоны он оказался на 41–54 мм ниже, а его наименьшие значения отмечались в Казахстанской провинции сухостепной зоны и Предуральской провинции лесостепной зоны.

Анализ термических условий анализируемого периода (1990–2020 гг.) выявил высокую изменчивость среднегодовой температуры ( $CV = 22.2–$

27.2%) в Казахстанских провинциях сухостепной и степной зон. Самая высокая термическая нестабильность наиболее вероятного периода вегетации яровой пшеницы (май–август), с коэффициентом вариации 7.6–7.8%, отмечена в Заволжских провинциях степной и сухостепной зон, самых теплых зонах области. Здесь среднегодовая температура воздуха исследуемого периода составила 5.7°С, а в среднем за май–август – 19.9–20.1°С (табл. 2).

Определение ГТК подтвердило достаточно низкую благоприятность условий увлажнения и температурного режима для полевых культур на всей территории области. Особенно напряженный режим сложился в Заволжской и Казахстанской провинциях сухостепной зоны, где средние значения ГТК исследуемого периода оказались равными 0.54 мм/°С, что свидетельствует о крайней степени засушливости климата. Наибольший размах ГТК в пределах анализируемых лет наблюдался в Заволжской (1.02 мм/°С) провинции сухостепной зоны. Здесь же отмечались наименьшие значения ГТК в разрезе лет (0.11 мм/°С, 2014 г.), в других территориях области его минимальные значения оказались выше на 0.12–0.21 мм/°С.

Анализ направленности современных климатических тенденций, определение их средней величины и размаха вариации позволили выявить в различных природно-сельскохозяйственных провин-

циях Оренбургской области устойчивый отрицательный тренд в выпадении атмосферных осадков (рис. 3а).

Наибольшее снижение количества осадков, как в годовом измерении (–75 мм), так и за период активной вегетации (–66 мм), отмечено в Заволжской провинции сухостепной зоны. Значительное сокращение осадков, приходящееся в основном на теплый период года, наблюдается также и в других природно-сельскохозяйственных провинциях. В качестве исключения можно отметить только Предуральскую провинцию лесостепной зоны, где обозначилась тенденция к небольшому росту годовых атмосферных осадков при незначительном их снижении в период активной вегетации.

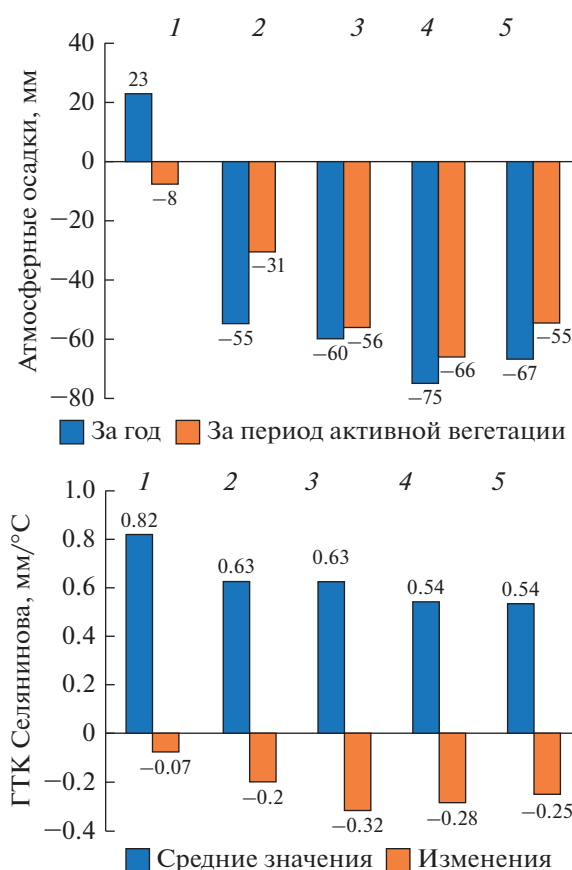
Ожидаемым следствием отрицательного тренда атмосферных осадков при одновременном нарастании сумм активных температур стало повсеместное снижение ГТК Селянинова (рис. 3б). Наибольшее снижение ГТК, превысившее 0.20 мм/°С, отмечено в Казахстанской провинции степной зоны и Заволжской и Казахстанской провинциях сухостепной зоны, а наименьшее снижение – в Предуральской провинции лесостепной зоны.

На фоне сохраняющихся институциональных проблем (см. ниже), препятствующих освобождению земледелия от бремени малопродуктивной пашни, крайне неблагоприятные гидротермические условия при традиционных почвозатратных технологических подходах значительно усиливают риски неустойчивости полевых агроценозов и сохранения биологического разнообразия прилегающих ландшафтов.

#### *Подходы к адаптации степного землепользования к современным антропогенным и климатическим изменениям*

Проблема сокращения и консервации малопродуктивных угодий признается научным сообществом РФ краеугольным камнем оптимизации степного землепользования, сохранения степных экосистем и воспроизводства утраченных почвенных ресурсов.

Пути оптимизации использования земельных ресурсов Оренбургской области как модельного степного региона на протяжении нескольких десятилетий активно изучались учеными НПО “Южный Урал”, Оренбургского СХИ, Института степи УрО РАН, ВНИИ зернового хозяйства, Сельскохозяйственной академии им. К.А. Тимирязева. В институте степи УрО РАН интенсивность подобных научных разработок, имеющих как фундаментально-научный, так и прикладной характер, не снижается с 1990-х годов. Так, установлены территориальные размеры выведения из использования малопродуктивной пашни – от



**Рис. 3.** Изменение величины атмосферных осадков (а) и ГТК Селянинова (б) за 31-летний период наблюдений (1990–2020 гг.) в природно-сельскохозяйственных провинциях Оренбургской области (1 – Предуральская лесостепной зоны, 2 – Заволжская степной зоны, 3 – Казахстанская степной зоны, 4 – Заволжская сухостепной зоны, 5 – Казахстанская сухостепной зоны).

10% к существующей площади пашни в зоне черноземных почв северо-запада области до 30% в зоне каштановых почв юго-востока, суммарно более 1.0 млн га (Левыкин и др., 2020; Чибилёв, 1997; Чибилёв и др., 2019). Аналогичные заключения, основанные на тщательном полевом обследовании территории области, приведены и в работах других исследователей (Блохин, 1997; Климентьев, 2000; Русанов, Кононов, 1998).

Разработанные Институтом степи подходы к оптимизации степного землепользования пока не находят ожидаемого решения. Процедура официального перевода пашни в сенокосно-пастбищные угодья остается законодательно недоработанной и крайне усложненной. Механизмы сохранения степей вне ООПТ также законодательно не закреплены и хозяйствующими субъектами не реализуются. В дополнение к этому, региональным министерством сельского хозяйства мотивирует-

ся вовлечение в пашню старовозрастных залежей, на которых наблюдается восстановление биоразнообразия.

Коренному изменению ситуации в лучшую сторону препятствуют институциональные проблемы степного землепользования, основными из которых, на наш взгляд, являются:

– *юридические*, закрепляющие государственный принцип регламентации землепользования. Действующие принципы земельного законодательства (в соответствии с ЗК РФ от 25.10.2001 г. № 136-ФЗ с изменениями и дополнениями, вступившими в силу с 01.09.2021 г.), с одной стороны, характеризуются излишней детализацией назначения и порядка использования конкретных земельных участков, с другой – имеют существенное значение для их владельцев, теряющих в цене доли при сокращении доли пашни как самого дорогого уголья;

– *землеустроительные и технологические*, связанные с трудоемкостью выделения на местности множества контуров малопродуктивных земель, особенно криволинейных почвенных выделов, неудобных для обработки, и в особенности при их расположении внутри земельного участка. Это же относится и к округлым пятнам солонцов, выведение которых из пашни трудно реализуемо на практике. К тому же не всегда понятны режимы содержания подобных выделов и технологические подходы, например, при организации сенокосения в случае залужения или при организации выпаса скота на небольших по площади пятнах.

Вполне очевидно, что сжатие низкопродуктивной пашни в регионах степной зоны России без ущерба для продовольственной безопасности страны возможно только при одновременной компенсации недополученных урожаев за счет повышения продуктивности оставшихся в обработке продуктивных земель. Коллективами ученых научных учреждений России (Кочуров, Лобковский, 2021), в том числе и Оренбургской области (Киришин, Дубачинская, 2020; Кислов, 2012; Часовских, 2012), проведена значительная работа в данном направлении, включая адаптацию агротехнологий к местным почвенно-климатическим условиям. Обосновывается переход от зональных систем земледелия и кормопроизводства к адаптивно-ландшафтному, почвозащитному, контурно-мелиоративному и др., приуроченным к агроэкологическим группировкам земель (Система ..., 1999). Разрабатываемые применительно к зональным провинциям в системе природно-сельскохозяйственного районирования, они рассматриваются в качестве основы формирования адаптивных систем сельскохозяйственного землепользования. Разработанная В.И. Киришиным (2019) схема агроэкологической группировки земель Оренбургской области, построенная в иерархии природно-сель-

скохозяйственного районирования (зона–провинция–агроэкологическая группа–тип–вид земель), предполагает выделение 15 агроэкологических групп земель для формирования оригинальных систем земледелия. В дополнение к этому для 46 видов земель предусматривается разработка агротехнологий различных уровней интенсификации. Применительно к указанным категориям земель сформирован набор культур и севооборотов, обоснована дифференциация систем обработки почвы, применения минеральных и органических удобрений, актуализирована перспективность наукоемких агротехнологий, консолидации и кооперации инновационно-технологических центров при научных и учебных учреждениях, повышения квалификации специалистов (Киришин, Дубачинская, 2020).

Следует отметить также, что в конце 1990-х годов при проведении широкомасштабных полевых исследований нами уже наблюдалась тенденция “социально-экономической” (терминология авторов) адаптации структуры сельскохозяйственных угодий к финансовым и трудовым ресурсам, а также попытка теоретического обоснования ее адаптации к географическим условиям и исходному аграрному потенциалу земель. В настоящее время, при сохраняющейся актуальности обозначенных направлений, усиливается значимость климатической и углеродной адаптации. В первом случае воспроизводимое почвенное плодородие не может быть эффективно реализовано в условиях засух, во втором – современное земледелие неизбежно будет ориентироваться на минимизацию выброса углерода в атмосферу.

Опираясь на отечественные разработки в области теории и практики оптимизации степного землепользования и адаптивно-ландшафтных систем земледелия, мы предприняли попытку их развития и актуализации применительно к современным условиям. На наш взгляд, адаптивно-ландшафтные системы земледелия в их классической трактовке наиболее эффективны для староосвоенных земледельческих регионов, прежде всего степных, а также для регионов с хорошо выраженной пластикой рельефа и ландшафтными разнообразием. Главным условием их практической реализации является решение вопроса о собственности на сельскохозяйственные угодья. Только собственник или долговременный пользователь земли сможет вложить существенные финансовые и трудовые ресурсы в действительно адаптивную оптимизацию своих угодий, создав системы точного земледелия со множеством контуров, выделов, мелиорацией и т.д.

Разрабатываемый нами адаптивный стратегический подход (на примере Оренбургской области) предполагает выделение особой категории ландшафтной структуры – ядра зональной ти-

пичности степей, выходящего за границы классических плакоров и поддерживающего потенциал развития зональных степных экосистем (бихолдеров). Входящие в ядро зональной типичности земли имеют наивысшую аграрную значимость, включают в себя элитный пахотный фонд и наделяются особым статусом защиты (сохранения). Предусматривается также выделение внутризональных (литогенных) разновидностей степей, в совокупности с ядром зональной типичности составляющих специфические степные ландшафты. Они характеризуются пространственной открытостью (просматриваемостью) и экологическим преобладанием узколистных злаков и иной травянистой растительности. Все остальные элементы ландшафтной структуры рассматриваются как неспецифические включения, малопригодные для земледелия, но наделяются особым статусом для сохранения ландшафтно-биологического разнообразия и являются основными объектами ООПТ.

Исходя из этого, в качестве основных путей решения сложившихся проблем степного землепользования представляется перспективной поляризация земельного фонда. Она предполагает формирование природоохранного и земледельческого полюсов. Природоохранный полюс формируется в соответствии с ландшафтной структурой для поддержания оптимального уровня ландшафтного и биологического разнообразия. Он характеризуется наличием массивов вторичных степных экосистем и сетью успешно функционирующих ООПТ. В земледельческий полюс входят наиболее ценные (элитные) пахотные угодья на классических степных плакорах, так называемая перманентная, или заповедная пашня. Отнесенные к элитному фонду земельные участки площадью не менее 100 га должны представлять собой выровненные обширные (и в то же время компактные) массивы в пределах придолинных, водораздельных плакоров надпойменных террас с уклоном не более 3°. К ним следует относить преимущественно однородные контура зональных полнопрофильных почв с долей солонцов не более 10%, содержанием гумуса не менее 3%, мощностью продуктивного почвенного слоя не менее 40 см и валовыми запасами гумуса не менее 100 т/га (Левыкин и др., 2020).

Полюса являются территориями наивысшего технологического напряжения, поддерживаемого особым вниманием, контролем и инвестициями со стороны государства.

Межполюсные же ландшафты и соответствующие им угодья отводятся для динамического землепользования, характеризующегося временной гибкостью (адаптивностью).

На основании вышеизложенного нами выделены следующие ландшафтные категории (на примере Оренбургской области):

- природоохранная – природоохранный полюс площадью 1.2 млн га (10% территории землепользования);
- перманентная пашня на плакорах – земледельческий полюс, 3.6 млн га (29%);
- степной бихолдер за границами плакоров, условно пахотопригодные угодья, 2.3 млн га (19%);
- внутризональные разновидности степей, базовые кормовые угодья, 2.8 млн га (22%);
- интрозональные ландшафты, кормовые угодья, 1.7 млн га (13%);
- азональные и экстразональные ландшафты, элементы экологического каркаса, 0.8 млн га, 6%.

Распорядителями наилучших почв с близкой к биопотенциальной урожайностью должны стать наиболее ответственные землепользователи – опытно-производственные хозяйства вузов и сузов, опытные станции, госсортоучастки.

Общая фундаментальная суть адаптивной поляризации заключается в применении интенсивных новационных земледельческих технологий на перманентной пашне и степесобразных (основанных на природоподобии) технологий гибкого управления степными агроландшафтами между полюсами, включая степной бихолдер, что представляется особенно важным для сохранения степной биологической титульности.

В условиях современных антропогенных и климатических изменений, особенно выраженных в Заволжской и Казахстанской провинциях степной и сухостепной зон, целесообразно внедрение природоподобных земледельческих технологий. Их реализация на перманентной пашне (земледельческий полюс) и особенно на землях степного бихолдера за границами плакоров (условно пахотнопригодные угодья) будет способствовать рациональному использованию лимитированных природных ресурсов и приведению ландшафтов в близкое к естественному состоянию.

Подобный подход предполагает нормализацию допустимых нагрузок на агроландшафты, поддержание их экологического баланса и снижение отрицательного экологического эффекта от техногенных факторов (Трофимов, Косолапов, 2013).

Результаты авторских полевых экспериментов и экспедиционных исследований (Gulyanov et al., 2021) свидетельствуют о целесообразности вклю-

чения в природоподобные земледельческие технологии следующих технологических приемов:

– основанных на *фитоподобии* – ландшафтно-экологическое пространственное планирование и организация землепользования путем вписывания полей в естественный природный ландшафт (по примеру контурно-колочного или межозерного земледелия, широко практикуемых в южных регионах Зауралья и Западной Сибири);

– основанных на *почвоподобии* – создание травяных экосистем и насыщение севооборотов многолетними травами, служащими естественным защитным покровом степных ландшафтов (Гулянов и др., 2019) и создающими благоприятные условия для почвообразования и развития почвенной биоты, поддерживающими запасы гумуса на исходном уровне или обеспечивающими их повышение на 0.3–0.6 т/га (Спиридонов, 2007; Каиров et al., 2019) в отличие от паровых полей и полей пропашных культур, характеризующихся ежегодными потерями гумуса до 1.5–2.5 т/га (Бельков, Максютгов, 2014). В дополнение к этому расширение посевных площадей многолетних трав, выступающих в качестве незаменимого источника кормов для сельскохозяйственных животных, способствует росту их поголовья и оптимизации отраслей растениеводства и животноводства, увеличению выхода ценных органических удобрений (навоз, навозная жижа), внесение которых в полях севооборота является дополнительным гарантом сбережения почвенного плодородия (Еськов и др., 2018);

– основанных на *степноподобии* – включение в севообороты бинарных (смешанных) посевов, представляющих собой одновременное выращивание на одном и том же поле двух и более культур с разными биологическими и морфологическими признаками, например, сочетание многолетних трав (донника, люцерны, эспарцета или вики) с основными культурами севооборота (пшеница озимая, кукуруза и т.д.) (Дедов и др., 2014). Сюда же следует отнести черезрядные посевы, например, кукурузы и сои, весенний подсев сои в междурядья (при широкорядном посеве) озимой пшеницы, убираемых в разное время и обеспечивающих с одного поля два урожая в год (Коржов и др., 2018), а также включение в севообороты разносортных посевов (смеси сортов) зерновых культур с целью повышения их устойчивости и объединения ценных хозяйственных признаков;

– основанных на *использовании скороспелых, засухоустойчивых и жаростойких сортов*, способных формировать зерно за короткий период вегетации, противостоять болезням и эффективно конкурировать с сорняками без излишней химической нагрузки;

– основанных на подходе к выбору приемов обработки почвы исходя из природного принципа “природа не пашет” – переход к влагосберегающей минимальной обработке почвы или ее полному исключению с мульчированием поверхности поля – *Mini-till, Strip-till, No-till, технологии прямого посева, Twin-Row, технологии нулевой обработки почвы, технологии разбросного поверхностного посева и др.*;

– основанных на подходе к уборке зерновых культур исходя из природного принципа “природа не косит” – уборка зерновых культур очесывающими жатками с оставлением на поле практически не поврежденного стеблестоя (с выбранным зерном), выполняющего экологические функции, аналогичные естественным травяным сообществам.

На землях природоохранного полюса целесообразны технологии охраны природы, применяемые для территориальной охраны ландшафтного и биологического разнообразия степей в режимах заповедника, заказника, памятника природы и т.п.

Таким образом, адаптивный стратегический подход и стратегический принцип адаптивной поляризации земельных угодий можно рассматривать как степную соадаптацию или синергические усилия человека и степных экосистем по приспособлению к изменениям климата и динамике углерода. Фундаментальная сущность подобной соадаптации заключается в направленности степных биологических видов (титульных) к одномоментной адаптации к климатическим изменениям и хозяйственной (прежде всего аграрной) деятельности человека, также стремящегося к климатической адаптации и создающего условия поддержания адекватного уровня ресурсов титульных степных и культурных видов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Активное вовлечение в сельскохозяйственный оборот степных угодий, особенно на неполнопрофильных, эрозионно неустойчивых почвах, традиционные почвозатратные подходы в земледелии, запредельные нагрузки на пастбища и повышающаяся засушливость климата являются основными вызовами устойчивому степному землепользованию Оренбургской области. Они создают угрозу сохранению биологического разнообразия, сопровождаются катастрофическим снижением почвенного плодородия, приводят к низкой реализации урожайного потенциала полевых культур. Обеднение зональных почв и крайне неблагоприятные гидротермические условия обостряют нестабильность земледелия, приводят к

варьированию валовых сборов, усложняют обеспечение продовольственной безопасности.

Наиболее приемлемым направлением оптимизации степного землепользования, сохранения степных экосистем и воспроизводства утраченных почвенных ресурсов является сокращение и консервация антропогенно деградированных угодий при одновременном повышении продуктивности остающихся в использовании. Реализация этого направления предполагает первоочередное решение институциональных проблем юридического, землеустроительного и технологического характера, препятствующих официальному изменению статуса сельскохозяйственных угодий, а также внедрение адаптивного стратегического подхода.

При сельскохозяйственном использовании степных угодий целесообразно применение природоподобных технологий. Их внедрение на перманентной пашне и условно пахотнопригодных почвах будет способствовать более эффективному использованию природных ресурсов и сокращению антропогенного воздействия на прилегающие ландшафты.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено в рамках НИР ОФИЦ УрО РАН (ИС УрО РАН) “Проблемы степного природопользования в условиях современных вызовов: оптимизация взаимодействия природных и социально-экономических систем”, № ГР АААА-А21-121011190016 -1.

#### FUNDING

The paper was conducted within the framework of SRW of OFRC the Institute of Steppe UB RAS “Problems of Steppe Management under the Conditions of Modern Challenges: Optimization of the Interaction Between Environmental and Socio-Economic systems,” no. АААА-А21-121011190016-1.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бельков Г.И., Максюттов Н.А.* Сохранение и повышение плодородия почв в современных условиях Оренбургской области // Изв. Оренбургского гос. аграрного ун-та. 2014. № 6 (50). С. 8–10.
- Блохин Е.В.* Экология почв Оренбургской области. Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 1997. 227 с.
- Гулянов Ю.А., Левыкин С.В., Казачков Г.В.* Природоподобные технологии пастбищного использования степных угодий в условиях природных и антропогенных изменений // Вопросы степеведения. 2019. № 15. С. 77–81. <https://doi.org/10.24411/9999-006A-2019-11511>
- Гулянов Ю.А.* Устойчивость агроценозов яровой пшеницы к современным климатическим изменениям в земледелии степной зоны Южного Урала // Тауврический вестн. аграрной науки. 2021. № 2 (26). С. 62–73. <https://doi.org/10.33952/2542-0720-2021-2-26-62-73>
- Дедов А.В., Кузнецова Т.А., Несмеянова М.А.* Бинарные посевы с бобовыми травами // Пермский аграрный вестн. 2014. № 2 (6). С. 10–18.
- Доспехов Б.А.* Методика полевого опыта. М.: Агропромиздат, 1985. 351 с.
- Еськов А.И., Лукин С.М., Мерзлая Г.Е.* Современное состояние и перспективы использования органических удобрений в сельском хозяйстве России // Плодородие. 2018. № 1 (100). С. 20–23. <https://doi.org/10.25680/S19948603.2018.100.05>
- Коржов С.И., Трофимова Т.А., Котов Г.В.* Биологическая активность почвы при совместном посеве культур // Земледелие. 2018. № 8. С. 8–10. <https://doi.org/10.24411/0044-3913-2018-10802>
- Кислов А.В.* Биологизация земледелия и ресурсосберегающие технологии в адаптивно-ландшафтных системах степной зоны Южного Урала. Оренбург: Издательский центр Оренбургского ГАУ, 2012. 276 с.
- Кирюшин В.И.* Научные предпосылки оптимизации использования земельных ресурсов // Вестн. Российской академии сельскохозяйственных наук. 2019. № 4. С. 7–10. <https://doi.org/10.30850/vrsn/2019/4/7-10>
- Кирюшин В.И., Дубачинская Н.Н.* Проблема освоения адаптивно-ландшафтных систем земледелия в Оренбургской области // Изв. Оренбургского гос. аграрного ун-та. 2020. № 6 (86). С. 9–14.
- Климентаев А.И.* Почвы степного Зауралья: ландшафтно-генетическая и экологическая оценка. Екатеринбург: Изд. УрО РАН, 2000. 350 с.
- Кочуров Б.И., Лобковский В.А.* Агрорландшафтная система земледелия как фундаментальная технологическая программа борьбы с опустыниванием // Проблемы региональной экологии. 2021. № 2. С. 44–51.
- Левыкин С.В., Чибилев А.А., Кочуров Б.И., Казачков Г.В.* К стратегии сохранения и восстановления степей и управления природопользованием на постцелинном пространстве // Изв. РАН. Сер. геогр. 2020. № 4. С. 626–636. <https://doi.org/10.31857/S2587556620040093>
- Русанов А.М., Кононов В.М.* Основные положения концепции пахотнопригодности земель // Матер. Российской научно-практической конф. “Оптимизация природопользования и охрана окружающей среды Южно-Уральского региона” (Оренбург, 25–27 марта 1998). Оренбург: Издательство Оренбургского гос. ун-та, 1998. С. 70–73.
- Рычков А.В.* Освоение целины и поиск новых внедренческих форм // Омский научный вестн. 2013. № 5 (122). С. 26–29.
- Система устойчивого ведения сельского хозяйства Оренбургской области / под ред. В.К. Еременко, А.Г. Крючкова, В.Е. Тихонова, Н.П. Часовских, Г.И. Белькова. Оренбург: Оренбургское книжное издательство, 1999. С. 6–117.
- Спиридонов А.М.* Многолетние бобовые травы как источник биологического азота в земледелии // Земледелие. 2007. № 3. С. 14.
- Трофимов И.А., Косолапов В.М.* Экологические проблемы в мире, стратегия природопользования и

- управления агроландшафтами // Вестн. Тамбовского ун-та. 2013. Т. 18. № 2. С. 544–547.
- Часовских Н.П. Повышение эффективности использования пашни как фактор стабилизации сельскохозяйственного производства в Оренбургской области // Изв. Оренбургского гос. аграрного ун-та. 2012. № 6 (38). С. 49–51.
- Чибилёв А.А. Ключевые проблемы степеведения и рационализации природопользования в степной зоне // Аридные экосистемы. 1997. Т. 3. № 6–7. С. 190–194.
- Чибилёв А.А., Левыкин С.В., Чибилёв (мл.) А.А. Степи России и Евразии: мегапроекты XX века и современное пространственное развитие // Матер. Всероссийской научной конф. “Мегапроекты в социально-экономическом развитии России” (Москва, 21–22 ноября 2019). М.: Издательство Белый ветер, 2019. С. 8–15.
- Чибилёв А.А.(мл.), Падалко Ю.А., Семенов Е.А., Руднева О.С., Соколов А.А., Григорьевский Д.В., Мелешкин Д.С. Очерки экономической географии Оренбургского края. Оренбург: Изд. ИС УрО РАН, 2018. Т. II. 144 с.
- Шеврина Е.В., Коробейникова О.А. Направление государственной поддержки сельских товаропроизводителей Оренбургской области // Экономика и предпринимательство. 2020. № 11 (124). С. 421–424. <https://doi.org/10.34925/EIP.2020.124.11.075>
- Fawaz M.M., Soliman S.A. The potential scenarios of the impacts of climate change on Egyptian resources and agricultural plant production // Open J. of Applied Sci. 2016. Vol. 4. № 4. P. 270–286. <https://doi.org/10.4236/ojapps.2016.64027>
- Gulyanov Yu.A., Chibilyov A.A., Levykin S.V., Yakovlev I.G. Modern climatic resources of the farming post-virgin land regions in Ural and West Siberia and their agricultural assessment // IOP Conf. Series: Earth and Environ. Sci. 2021. № 624. P. 012226. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/624/1/012226>
- Harrison S., Spasojevic V.J., Li D. Climate and plant community diversity in space and time // Proc. Nat. Acad. Sci. USA. 2020. Vol. 117. № 3. P. 4464–4470. <https://doi.org/10.1073/pnas.1921724117>
- Kaipov Y.Z., Akchurin R.L., Shakirov F.T., Shamsutdinov V.I. Experience of biologic farming in the middle Predural of Russia // J. of Agric. and Environ. 2019. № 4 (12). P. 99–104. <https://doi.org/10.23649/jae.2019.4.12.19>
- Sommer J.H., Kreft H., Kier G., Mutke J., Barthlott W., Jetz W. Projected impacts climate change on regional capacities for global plant species richness // Proc. of the Royal Society B: Biol. Sci. 2010. Vol. 277. № 1692. P. 2271–2280. <https://doi.org/10.1098/rspb.2010.0120>

## Problems of Steppe Land Use Adaptation to Anthropogenic and Climatic Changes (the Case of Orenburg Oblast)

Yu. A. Gulyanov<sup>1</sup>, A. A. Chibilyov (jr.)<sup>1</sup>, \*, A. A. Chibilyov<sup>1</sup>, and S. V. Levykin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute of Steppe, Orenburg Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Orenburg, Russia

\*e-mail: orensteppe@mail.ru

Among the Russian federal subjects located in the steppe zone, Orenburg Oblast is a typical steppe region with developed grain production. The traditional soil-intensive technologies practiced here for a long time and focused mainly on the mobilization of natural soil fertility have led to widespread steppe lands' degradation, territory desiccation, a decrease in the productivity of agrocenoses, and a critical reduction of landscape and biological diversity. The purpose of the study was the analysis of modern challenges to sustainable steppe land use, identification of historical, technological, and climatic preconditions for reducing the lands' quality and agricultural productivity (using the case of Orenburg Oblast), development and scientifically substantiating of methods of steppe land-use adaptation to modern soil and climate changes. Electronic free access data about climate resources and economic activity results, as well as expedition materials, were used. The analysis of the field cultivation effectiveness, the climatic trends identification, and the determination of their relationship were carried out in accordance with natural and agricultural zoning and lands' agroecological grouping. The stable soil-intensive orientation of the current agricultural lands' structure has been confirmed, as before. The extremely unfavorable dynamics of hydrothermal conditions has an expressed arid trend in the Trans-Volga and Kazakhstan areas of the steppe and dry-steppe zones of the region. It is accompanied by a decrease in the productivity of artificial and natural cenoses' phytomass. There is a direct relationship between the productivity of field crops (spring wheat) with the amount of precipitation and the Selyaninov's HTC during the growing season. Also, there is an inverse relationship with the sum of active temperatures. The legal, land management and technological problems of the land structure optimizing, obstructing the official change of land status, are systematized. The introduction of an adaptive strategic approach is proposed. The scientific theories optimizing steppe land use through adaptive landscape farming systems are analyzed, the probability of their implementation in current conditions is estimated. The use of nature-like agricultural technologies that contribute to more efficient natural resources' use and sparing anthropogenic impact on adjacent landscapes is justified.

**Keywords:** degradation of steppe lands, reduction of landscape and biological diversity, reduction of productivity of agrocenoses, steppe land use optimization, adaptive landscape farming systems

## REFERENCES

- Bel'kov G.I., Maksyutov N.A. Maintenance and enhancement of soil fertility under modern conditions of the Orenburg Region. *Izv. Orenburg. Gos. Agrarn. Univ.*, 2014, no. 6 (50), pp. 8–10. (In Russ.).
- Blokhin E.V. *Ekologiya pochv Orenburgskoi oblasti* [Soil Ecology of the Orenburg Region]. Yekaterinburg: UrO RAN, 1997. 227 p.
- Chasovskikh N.P. Improving the efficiency of arable land use as a factor of stabilization of agricultural production in the Orenburg region. *Izv. Orenburg. Gos. Agrarn. Univ.*, 2012, no. 6 (38), pp. 49–51. (In Russ.).
- Chibilev A.A., Jr., Padalko Yu.A., Semenov E.A., Rudneva O.S., Sokolov A.A., Grigorevskii D.V., Meleshkin D.S. *Ocherki ekonomicheskoi geografii Orenburgskogo kraia* [Essays on the Economic Geography of the Orenburg Region]. Orenburg: Inst. Stepi UrO RAN, 2018, vol. 2. 144 p.
- Chibilev A.A., Levykin S.V., Chibilev A.A., Jr. Steppes of Russia and Eurasia: megaprojects of the XX century and modern spatial development. In *Mat. Vseross. nauchn. konf. "Megaproekty v sotsial'no-ekonomicheskoy razvitiy Rossii"*, Moskva, 21–22 noyabrya 2019 [Proc. All-Russ. Sci. Conf. "Megaprojects in the Socio-Economic Development of Russia", Moscow, November 21–22, 2019]. Moscow: Belyi Veter Publ., 2019, pp. 8–15. (In Russ.).
- Dedov A.V., Kuznetsova T.A., Nesmeyanova M.A. Binary sowings with legumes. *Perm. Agrarn. Vestn.*, 2014, no. 2 (6), pp. 10–18. (In Russ.).
- Dospikhov B.A. *Metodika polevogo opyta* [Field Experience Methodology]. Moscow: Agropromizdat Publ., 1985. 351 p.
- Es'kov A.I., Lukin S.M., Merzlaya G.E. Current status and perspectives of organic fertilizers application in Russian agriculture. *Plodorodie*, 2018, no. 1, pp. 20–23. (In Russ.).  
<https://doi.org/110/25680/S19948603.2018.100.05>
- Fawaz M.M., Soliman S.A. The potential scenarios of the impacts of climate change on Egyptian resources and agricultural plant production. *Open J. Appl. Sci.*, 2016, vol. 6, no. 4, 66004.  
<https://doi.org/10.4236/ojapps.2016.64027>
- Gulyanov Yu.A., Chibilyov A.A., Levykin S.V., Yakovlev I.G. Modern climatic resources of the farming post-virgin land regions in Ural and West Siberia and their agricultural assessment. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, 2021, vol. 624, no. 1, 012226.  
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/624/1/012226>
- Gulyanov Yu.A., Levykin S.V., Kazachkov G.V. Natural-lice technologies for pastoral use of degrees in the conditions of natural and anthropogenic changes. *Vopr. Stepevedeniya*, 2019, no. 15, pp. 77–81. (In Russ.).  
<https://doi.org/10.24411/9999-006A-2019-11511>
- Harrison S., Spasojevic V.J., Li D. Climate and plant community diversity in space and time. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 2020, vol. 117, no. 9, pp. 4464–4470.  
<https://doi.org/10.1073/pnas.1921724117>
- Kaipov Y.Z., Akchurin R.L., Shakirov F.T., Shamsutdinov V.I. Experience of biologic farming in the middle Predural of Russia. *J. Agric. Environ.*, 2019, no. 4 (12), pp. 99–104.  
<https://doi.org/v10.23649/jae.2019.4.12.19>
- Kiryushin V.I. Scientific prerequisites for optimizing the use of land resources. *Vestn. Ross. Akad. S–kh. Nauk*, 2019, no. 4, pp. 7–10. (In Russ.).  
<https://doi.org/10.30850/vrsn/2019/4/7-10>
- Kiryushin V.I., Dubachinskaya N.N. The problem of development of adaptive landscape systems of agriculture in the Orenburg region. *Izv. Orenburg. Gos. Agrarn. Univ.*, 2020, no. 6 (86), pp. 9–14. (In Russ.).
- Kislov A.V. *Biologizatsiya zemledeliya i resursoberegayushchie tekhnologii v adaptivno-landshaftnykh sistemakh stepnoi zony Yuzhnogo Urala* [Biologization of Agriculture and Resource-Saving Technologies in Adaptive Landscape Systems of the Steppe Zone of the Southern Urals]. Orenburg: Orenburg. Gos. Agrarn. Univ., 2012. 276 p.
- Kliment'ev A.I. *Pochvy stepnogo Zaural'ya: landshaftno-geneticheskaya i ekologicheskaya otsenka* [Soils of the Steppe Trans-Urals: Landscape-Genetic and Ecological Assessment]. Yekaterinburg: UrO RAN, 2000. 350 p.
- Kochurov B.I., Lobkovskii V.A. Agro-landscape system of agriculture as a fundamental technological program for combating desertification. *Probl. Reg. Ekol.*, 2021, no. 2, pp. 44–51. (In Russ.).
- Korzhev S.I., Trofimova T.A., Kotov G.V. Biological activity of soil under combined crops. *Zemledelie*, 2018, no. 8, pp. 8–10. (In Russ.).  
<https://doi.org/10.24411/0044-3913-2018-10802>
- Levykin S.V., Chibilev A.A., Kochurov B.I., Kazachkov G.V. To the strategy of steppes conservation and restoration and natural resource use in the area of post-virgin lands. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2020, no. 4, pp. 626–636. (In Russ.).  
<https://doi.org/10.31857/S2587556620040093>
- Rusanov A.M., Kononov V.M. The main provisions of the concept of arable land suitability. In *Optimizatsiya prirodopol'zovaniya i okhrana okruzhayushchei sredy Yuzhno-Ural'skogo regiona* [Optimization of Nature Management and Environmental Protection in the South Urals Region]. Orenburg: Orenburg. Gos. Univ., 1998, pp. 70–73. (In Russ.).
- Rychkov A.V. The development of virgin land and the search for new innovative forms. *Omsk. Nauchn. Vestn.*, 2013, vol. 122, no. 5, pp. 26–29. (In Russ.).
- Shevrina E.V., Korabeinikova O.A. Directions of state support for rural producers of the Orenburg region. *Ekonomika i Predprinimatel'stvo*, 2020, no. 11, pp. 421–424. (In Russ.).  
<https://doi.org/10.34925/EIP.2020.124.11.075>
- Sistema ustoichivogo vedeniya sel'skogo khozyaistva Orenburgskoi oblasti* [The System of Sustainable Agriculture of the Orenburg Region]. Eremenko V.K., Kryuchkov A.G., Tikhonov V.E., Chasovskikh N.P., Bel'kov G.I., Eds. Orenburg: Orenburg. Knizhn. Izd., 1999. 136 p.
- Sommer J.H., Kreft H., Kier G., Mutke J., Barthlott W., Jetz W. Projected impacts climate change on regional capacities for global plant species richness. *Proc. R. Soc. B: Biol. Sci.*, 2010, vol. 277, no. 1692, pp. 2271–2280.  
<https://doi.org/10.1098/rspb.2010.0120>
- Spiridonov A.M. Perennial legumes as a source of biological nitrogen in agriculture. *Zemledelie*, 2007, no. 3, pp. 14. (In Russ.).
- Trofimov I.A., Kosolapov V.M. Ecological problems in the world, the strategy of nature management and management of agricultural landscapes. *Vestn. Tambov. Univ.*, 2013, vol. 18, no. 2, pp. 544–547. (In Russ.).
- Zabelin I.M. *Puteshestvie v glub' nauki* [Journey into the Depths of Science]. Moscow: Mysl' Publ., 1976. 78 p.



## ПРОБЛЕМЫ ДЕГРАДАЦИИ ЗЕМЕЛЬ И УСТОЙЧИВОГО ЗЕМЛЕПОЛЬЗОВАНИЯ

УДК 631.4:911.52

### ДИНАМИКА ДЕГРАДАЦИИ ЗЕМЕЛЬ В РОСТОВСКОЙ ОБЛАСТИ

© 2022 г. О. С. Безуглова<sup>а</sup>, \*, И. Н. Ильинская<sup>б</sup>, В. Е. Закруткин<sup>а</sup>, О. Г. Назаренко<sup>с</sup>,  
Ю. А. Литвинов<sup>а</sup>, Э. А. Гаевая<sup>б</sup>, А. А. Меженков<sup>а</sup>, А. И. Жумбей<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

<sup>б</sup>Федеральный Ростовский аграрный научный центр, п. Рассвет, Россия

<sup>с</sup>Государственный центр агрохимической службы “Ростовский”, п. Рассвет, Россия

\*e-mail: lola314@mail.ru

Поступила в редакцию 04.07.2021 г.

После доработки 09.09.2021 г.

Принята к публикации 12.10.2021 г.

Проведена оценка состояния геосистем (включая агроэкосистемы) Ростовской области. Для наиболее уязвимого региона – юго-востока области – рассчитаны площади земель, подвергающиеся деградационным процессам, в сравнении со средними показателями по области. Дана сравнительная оценка показателей аридности в пространственно-временном аспекте, особое внимание уделено дефициту увлажнения, являющемуся одним из основных индикаторов засушливости территории. Индекс аридности, определенный с использованием различных методов расчета по данным репрезентативных метеостанций, показал, что засушливость возросла во всех районах области, что свидетельствует об общей тенденции к нарастанию аридности климата. На основе архивных и актуальных спутниковых снимков выполнены расчет нормализованного вегетационного индекса (Normalized Difference Vegetation Index) и оценка изменения состояния естественного растительного покрова для территории Ростовской области: преобладающей для южных, юго-восточных и северных районов области является изреженная растительность, отмечена тенденция к снижению площадей с густой растительностью. В западных и центральных районах области отмечается тренд к постепенному увеличению территорий с густой растительностью. По результатам сплошного агрохимического обследования установлено, что с 1960 по 2000 г. в почвах агроландшафтов наблюдалось постепенное уменьшение гумусированности, кратность снижения за 40 лет составила 1.2–1.3. Однако начиная с 2000-х годов, содержание гумуса в пахотном слое находится в определенном равновесии, характерном для биоклиматических и производственных условий Ростовской области, при отсутствии процессов эрозии снижение содержания гумуса не наблюдается. Проведена также оценка состояния лесных полос на основе данных дистанционного зондирования с привлечением архивных материалов почвенного обследования. Снижение площади лесополос является одним из индикаторов изменения климата и его можно использовать для задач оценки процессов опустынивания.

*Ключевые слова:* деградация почв, опустынивание, индекс NDVI, аридизация климата, оценка устойчивости экосистем

**DOI:** 10.31857/S2587556622010034

### ВВЕДЕНИЕ

Деградация земель на юге России является одной из важнейших экологических проблем, последствия которой сказываются как на состоянии окружающей природной среды, так и на темпах экономического развития региона. Под термином “земли” нами понимаются “территории, ограниченные однотипным хозяйственным использованием или назначением в рамках естественных или искусственных оконтуривающих границ и обладающие тем или иным почвенным покровом”<sup>1</sup>. Следовательно, наиболее общим

свойством земель является их почвенный покров, деградация которого неминуемо приводит к деградации земель. Однако однотипное хозяйствование обеспечивается не только однотипностью почвенных свойств, но и схожими климатическими условиями. Именно поэтому, рассматривая вопросы деградации земель, прежде всего, следует обратить внимание на климатические условия и характеристики почвенного покрова, в том числе проявление эрозии почв, состояние растительности по вегетационному индексу, состояние лесных полос.

Ростовская область является примером разнообразия природных условий: на ее территории в меридиональном направлении степная зона чер-

<sup>1</sup> Письмо Роскомзема от 27.03.1995 № 3-15/582.

ноземных почв сменяется сухостепной зоной с каштановыми почвами, а на крайнем юго-востоке находится зона полупустыни со светло-каштановыми почвами, на долю которой приходится всего 1.2% от общей территории области. Одной из основных причин деградационных процессов является усиление аридизации территорий, в пределах Ростовской области это особенно актуально для условий полупустыни (Безуглова и др., 2019; Bezuglova et al., 2020).

Одним из главных этапов перехода к стабильному развитию является оценка устойчивости локальных и региональных экосистем, определение допустимого на них антропогенного воздействия (Булатов, Игенбаева, 2008; Cardinale et al., 2012). В настоящее время эта задача не имеет достаточно-го теоретического обоснования (Bengtsson et al., 2003; Ускова, 2020), хотя в прикладном аспекте сделано достаточно много (Sachs et al., 2021). Особенно актуальна она для территорий, где антропогенные (природно-антропогенные) системы сформировались на основе слабоустойчивых уязвимых ландшафтов: превышение на них антропогенной нагрузки приводит к деградации и резкому ухудшению качества природы и условий хозяйствования (Elizbarashvili et al., 2018; Hector et al., 1999; Tilman and Downing, 1994). Примером подобной ситуации могут служить юго-восточные районы Ростовской области, граничащие с Калмыкией и Волгоградской областью. Административно это Дубовский, Заветинский, Зимовниковский и Ремонтненский районы, занимающие около 17.5% площади области, или примерно 17520 км<sup>2</sup>.

В пределах означенной территории среди деградационных процессов наиболее интенсивно проявляются ветровая и водная эрозия, дегумификация, засоление почв, опустынивание. Здесь опустыниванием в различных его формах охвачено более половины территории (около 800 тыс. га земель), а остальная часть потенциально опасна в этом отношении (Закруткин и др., 2002б). Развитие этого процесса способствуют засухи и частые суховейные явления, малое количество атмосферных осадков, которое варьирует от 428 мм в год в Дубовском районе до 322 мм в Ремонтненском, что существенно ниже среднеобластного значения (Лурье, Панов, 2018). Коэффициент увлажнения изменяется от 0.32 в Заветинском районе до 0.37 в Зимовниковском, а в летний период снижается до 0.17, что близко к условиям пустыни.

Солонцовые комплексы занимают до 75% всей территории юго-восточных районов, дефлированные почвы — 32%, а подверженные водной эрозии — 36%. Совместное развитие водной и ветровой эрозии наиболее интенсивно проявлено на территории Ремонтненского района. Примечательно, что средние значения по районам в 4 раза

превышают среднеобластной показатель (Закруткин и др., 2002б).

Цель исследований — всесторонний анализ динамики деградационных процессов и их предпосылок (с акцентом на самый уязвимый регион Ростовской области — юго-восток), включающий сопоставление климатических изменений и степени аридности климата за периоды 1961–1990 и 2010–2020 гг., изучение состояния растительного покрова посредством расчета нормализованного вегетационного индекса (NDVI) за эти же годы, динамики содержания гумуса, как интегрального показателя уровня плодородия.

## ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Ростовская область находится на юго-западе европейской части России и занимает обширную территорию в речном бассейне Нижнего Дона. По состоянию на 1 января 2021 г. земельный фонд Ростовской области составил 10096.7 тыс. га, из которых земли сельскохозяйственного назначения занимают 8863.1 тыс. га<sup>2</sup>. Согласно природно-сельскохозяйственному районированию земельного фонда России область преимущественно расположена в умеренном природно-сельскохозяйственном поясе. Среднегодовое количество осадков составляет 424 мм. Отличительной особенностью климата является уменьшение осадков с запада (650 мм) на восток (400 мм). Сумма активных температур составляет 3200–3400°C, продолжительность безморозного периода 175–185 дней. Количество дней с суховеями в период с апреля по октябрь колеблется от 90 до 100, индекс аридности равен 0.5 (Золотокрылин и др., 2020; Bezuglova et al., 2020).

Для сравнения климатических характеристик за период 1961–1990 гг. с последним пятилетним периодом 2016–2020 гг. использовали показатели пяти репрезентативных метеостанций (рис. 1). Метеостанция Заветное обслуживает юго-восточную часть Ростовской области на границе с Калмыкией, характеризующуюся крайне засушливым климатом и почти сухим вегетационным периодом с суммой осадков 200 мм и менее. Продолжительные периоды бездождя, суховеи и пыльные бури — обычное явление для данной зоны. Распределение ландшафтов по территориям юго-восточных административных районов Ростовской области характеризуется крайне узким спектром природного разнообразия ресурсов сельскохозяйственного производства. При практическом

<sup>2</sup> Доклад о состоянии и использовании земель в Ростовской области в 2020 году. Управление Федеральной службы государственной регистрации, кадастра и картографии по Ростовской области, 2021. <https://rosreestr.gov.ru/site/open-service/statistika-i-analitika/rostovskaya-oblast/svedeniya-o-sostoyanii-i-ispolzovanii-zemel-v-rostovskoy-oblasti/> (дата обращения 02.07.2021).

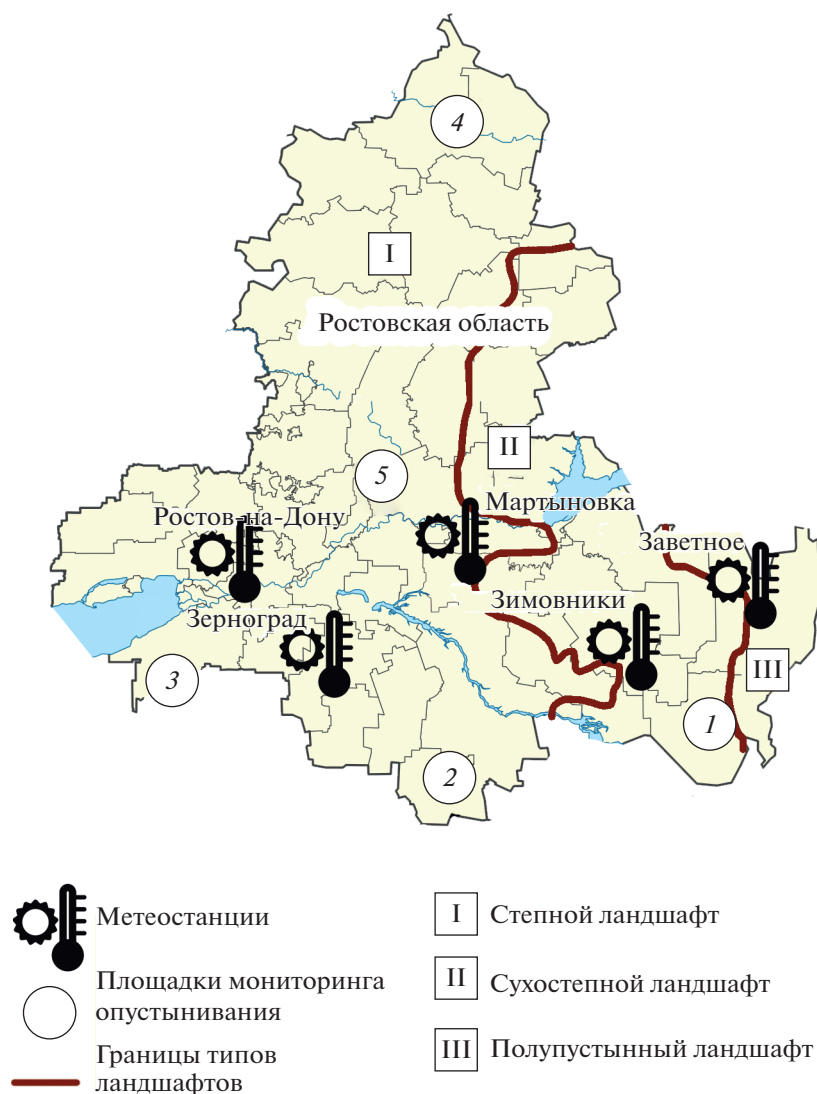


Рис. 1. Расположение площадок мониторинга и репрезентативных метеостанций на территории Ростовской области.

отсутствии полупустынного ландшафта в Дубовском и Зимовниковском районах в Заветинском и Ремонтненском он занимает соответственно 32 и 38% их территории (табл. 1).

Данные других четырех метеостанций (Ростов-на-Дону, Зерноград, Мартыновка, Зимовники позволяют охарактеризовать остальные ад-

министративные районы Ростовской области. В общих чертах климат этой части области можно описать как умеренно жаркий недостаточного увлажнения. Сумма активных температур за вегетационный период достигает 3000–3700°C. Число суховейных дней с относительной влажностью воздуха менее 30% составляет 40–55 дней. Коли-

Таблица 1. Распределение ландшафтов по территориям административных районов юго-востока Ростовской области

Тип ландшафта	Заветинский		Ремонтненский		Дубовский		Зимовниковский	
	км <sup>2</sup>	%	км <sup>2</sup>	%	км <sup>2</sup>	%	км <sup>2</sup>	%
Сухостепной	2441.17	52	1737.65	46	3322.68	83	4086.45	81
Полупустынный	1502.25	32	1435.45	38	36.02	0.1	—	—
Луговой	751.12	16	604.4	16	680.54	17	989.55	19

чество атмосферных осадков по сравнению с первым районом возрастает до 250–330 мм (Ильинская, 2005).

С целью изучения процессов опустынивания на территории Ростовской области были выделены 5 мониторинговых площадок (МП), отличающихся по географическому положению, почвенному покрову, характеру растительности, геоморфологии и климатическим особенностям (см. рис. 1). Мониторинговые площадки подбирались с учетом расположения репрезентативных метеостанций.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для решения задач изучения динамики процессов опустынивания на территории Ростовской области были использованы архивные и актуальные материалы почвенного обследования и данные дистанционного зондирования Земли. Архивные материалы о почвенном покрове были предоставлены Государственным центром агрохимической службы “Ростовский”, данные дистанционного зондирования территории области получены из открытых источников<sup>3</sup>. По методике, разработанной на базе Московского государственного и Южного федерального университетов (Голозубов и др., 2020), проведена выборочная оцифровка материалов средне- и крупномасштабного почвенного обследования<sup>4</sup> и карт землепользований.

Для классификации климата были использованы следующие показатели: гидротермический коэффициент Селянинова (ГТК), коэффициент увлажнения по Н.Н. Иванову ( $K_u$ ), испаряемость ( $E_0$ ). Рассчитывали также дефицит увлажнения  $D_u$  по разности значений испаряемости и атмосферных осадков; индексы аридности по Торнтвейту и по Стенцу (Иванов, 1954; Селянинов, 1928; Хромов, Мамонтова, 1974).

Для межрегиональной оценки биологической продуктивности почв использована величина биоклиматического потенциала (БКП), учитывающего влияние тепла и влаги на продуктивность растений. С ростом температуры до оптимальных значений ускоряются не только биоклиматические, но и биофизические процессы, влияющие на продуктивность растений и почвенное плодородие. Совокупное влияние температурного фактора на продуктивность растений выражено суммой среднесуточных температур более 10°C за период вегетации, т.е. их продуктивность пропорциональна увеличению суммы температур. Такое влияние вы-

ражается формулой для относительных значений биоклиматического потенциала (Шашко, 1985).

$$\text{БКП} = K_{p(KY)} \left( \frac{\sum t_{\text{ак}}}{\sum t_{\text{ак(баз)}}} \right), \quad (1)$$

где БКП – относительное значение биоклиматического потенциала;  $K_{p(KY)}$  – коэффициент роста урожайности по показателю атмосферного увлажнения;  $\sum t_{\text{ак}}$  – сумма средних суточных температур воздуха за период активной вегетации в данном месте, °C;  $\sum t_{\text{ак(баз)}}$  – базисная сумма средних суточных температур воздуха за период активной вегетации, относительно которой проводится сравнительная оценка, °C.

За  $\sum t_{\text{ак(баз)}}$  принимается сумма на границе полевого земледелия (1000°C).

В приведенной формуле  $K_{p(KY)}$  представляет собой отношение урожайности в данных условиях влагообеспеченности к урожайности в условиях оптимальной влагообеспеченности. На ограниченных территориях оценку БКП целесообразно проводить в баллах ( $B_k$ ) относительно средней по региону и оптимальной продуктивности по формуле (Шашко, 1985):  $B_k = 55 \text{БКП}$ , где:  $B_k$  – биоклиматический индекс, 55 – эмпирический коэффициент. Цена балла определяется отношением продуктивности культуры в зерновых единицах к баллу оценки биологической продуктивности земель  $B_k$  и является показателем сопоставимой оценки интенсивности земледелия при сравнимом уровне плодородия почвы.

Одним из главных критериев определения устойчивости экосистем выступает величина биомассы. Чем больше биомасса и ее разнообразие, тем выше устойчивость системы. Альтернативным методом определения устойчивости природных и антропогенных систем является прямое измерение соотношения использованной растениями лучистой энергии к общей массе поглощенной на этой территории энергии (Акимова, Хаскин, 1994).

Изучение состояния растительного покрова выполнено посредством расчета нормализованного вегетационного индекса (NDVI) по данным Landsat<sup>5</sup> за 1979, 1990, 2000, 2010 и 2020 гг. Расчет NDVI производился в программном обеспечении Quantum GIS с применением инструмента “калькулятор растров”. Алгоритм расчета представляет собой формулу расчета NDVI, записанную в виде отношения разности и суммы значений ближнего инфракрасного и красного каналов<sup>6</sup>.

<sup>3</sup> <https://earthexplorer.usgs.gov/>

<sup>4</sup> Материалы средне- и крупномасштабного почвенного обследования Ростовской области. НИИ ЮЖГИПРОЗЕМ, 1955–1995 гг.

<sup>5</sup> Официальный сайт Геологической службы США. <https://earthexplorer.usgs.gov/> (дата обращения 14.06.2021).

<sup>6</sup> NDVI – теория и практика. <https://gis-lab.info/qa/ndvi.html> (дата обращения 15.06.2021).

**Таблица 2.** Агрометеорологические показатели территории Ростовской области за вегетационный период по репрезентативным метеостанциям, 2016–2020 гг., среднее

Показатель	Метеорологические станции					Среднее
	1	2	3	4	5	
Среднемесячная температура, $T$ , °С	20.05	19.87	20.05	19.93	20.02	20.0
Сумма активных температур, °С	3650.7	3643.0	3548.8	3652.9	3674.1	3634.0
Сумма осадков, $P$ , мм (числитель 2016–2020 гг., знаменатель 1961–1990 гг.)	<u>257.4</u>	<u>243.1</u>	<u>208.8</u>	<u>172.6</u>	<u>168.7</u>	<u>210</u>
Относительная влажность, $r$ , %	54.3	57.8	51.1	52.0	51.0	53.2
ГТК	0.70	0.67	0.59	0.47	0.46	0.58

*Примечание.* Наименования метеорологических станций: 1 – Ростов-на-Дону, 2 – Мартыновка, 3 – Зерноград, 4 – Зимовники, 5 – Заветное.

Оценку состояния растительности проводили на территориях, не используемых в качестве пашни, на которых полностью или частично сохранилась естественная растительность: сенокосы, пастбища, залежь, неудобья. Выделение подобных участков стало возможным после выполнения оцифровки карт землепользований территории МП. В пределах площадок были отобраны спутниковые снимки Landsat с временным диапазоном 10–11 лет (1979, 1990, 2000, 2010, 2020 гг.), что позволило отследить динамику изменения состояния растительности за последние 40 лет. Для получения оперативной оценки состояния растительности и оценки фитомассы были использованы снимки, выполненные в июне–июле, в момент максимальной вегетации растений.

Оценку изменения содержания гумуса в почвах земель сельскохозяйственного назначения осуществляли по данным Агрохимической службы Ростовской области. Сбор информации получен при сплошном агрохимическом обследовании, которое осуществляется раз в пять лет, и при проведении ежегодных наблюдений на реперных участках агроэкологического мониторинга. Реперные участки (поле или часть поля) заложены как на пахотных землях, так и на сенокосах и пастбищах практически в каждом административном районе.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

**Динамика климата.** За последние тридцать лет выявлено, что сумма атмосферных осадков в среднем по пяти репрезентативным метеостанциям снизилась на 52 мм, или на 19.8%, что подтверждает величина ГТК Селянинова, который изменяется от 0.7 до 0.46 при движении с запада на восток, составив в среднем 0.58 (табл. 2).

Для оценки степени аридности территории были использованы ряды длительных наблюдений за основными метеорологическими показателями указанных метеостанций за периоды

1961–1990 и 2016–2020 гг. с целью их сравнения. При движении с запада на восток испаряемость за вегетационный период увеличивается, за последние пять лет она составила 952–1118 мм, что в три и более раз превышает сумму атмосферных осадков. Дефицит увлажнения вырос с 709 до 969 мм. При этом коэффициент увлажнения снизился с 0.25 до 0.17 (табл. 3).

При сравнении значений осредненных показателей за период 1961–1990 гг. с осредненными показателями за последние пять лет установлено увеличение испаряемости на 32.1%, дефицита увлажнения на 57.2%, коэффициента увлажнения на 33.3%. При этом рост индекса аридности по Стенцу составил 64.9%, а по Торнтвейту – 18.8%.

В географическом аспекте наиболее существенные изменения в сторону усиления аридности наблюдаются в Зимовниковском районе, что хорошо иллюстрирует коэффициент кратности увеличения показателя за последние 30 лет. Далее по напряженности идут районы, попадающие под наблюдение метеостанции в Зернограде. Направленность изменений в климатических характеристиках здесь такая же, как и на крайнем юго-востоке области (Заветинский район). Однако показатели, характеризующие степень аридности, возросли по всей области, что свидетельствует об общей тенденции к нарастанию аридности климата.

**Динамика состояния растительного покрова.** Такие изменения в климатических характеристиках не могли не сказаться на растительном покрове. На территории МП были выделены участки с естественной или малоизмененной естественной растительностью (см. рис. 1). Выбор участков определен тем, что на сельскохозяйственных территориях проективное покрытие определяется не только свойствами почв и климатическими условиями, но и технологиями возделывания, уровнем хозяйствования. Динамика состояния растительного покрова оценивалась по изменению площади изреженной (0–0.33) и густой (0.33–

**Таблица 3.** Оценка степени аридности территории Ростовской области за вегетационный период по репрезентативным метеостанциям, среднее (в числителе – данные за 2016–2020 гг., в знаменателе – данные за 1961–1990 гг.)

Показатель	Метеорологические станции										Среднее	Изменение, %
	Ростов н/Д		Мартыновка		Зерноград		Зимовники		Заветное			
	Ео	*	Ду	*	Ку	*	АІ	*	АІ	*		
Испаряемость, $E_0$ , мм	$\frac{1027}{786}$	1.3	$\frac{952}{785}$	1.2	$\frac{1104}{781}$	1.4	$\frac{1118}{766}$	1.4	$\frac{1138}{920}$	1.4	$\frac{1068}{808}$	32.1
Дефицит увлажнения, $D_y$ , мм	$\frac{770}{489}$	1.6	$\frac{709}{542}$	1.3	$\frac{895}{525}$	1.7	$\frac{945}{455}$	2.1	$\frac{969}{715}$	1.4	$\frac{857}{545}$	57.2
Коэффициент увлажнения, $K_y$ по Иванову	$\frac{0.25}{0.38}$	1.5	$\frac{0.26}{0.31}$	1.2	$\frac{0.23}{0.33}$	1.4	$\frac{0.18}{0.41}$	2.3	$\frac{0.17}{0.23}$	1.5	$\frac{0.22}{0.33}$	33.3
Индекс аридности, АІ, по Стенцу	$\frac{3.99}{2.65}$	1.5	$\frac{3.92}{3.23}$	1.2	$\frac{5.29}{3.05}$	1.7	$\frac{6.48}{2.46}$	2.6	$\frac{6.75}{4.48}$	1.5	$\frac{5.08}{3.08}$	64.9
Индекс аридности, АІ, по Торнтвейту	$\frac{74.9}{62.2}$	1.2	$\frac{74.5}{69.0}$	1.1	$\frac{81.1}{67.2}$	1.2	$\frac{84.5}{59.4}$	1.4	$\frac{85.1}{77.7}$	1.2	$\frac{80.2}{67.5}$	18.8

\* Кратность увеличения/снижения показателя за 25 лет.

0.66) растительности для выбранных площадок (рис. 2).

Результаты расчета индекса NDVI показали, что преобладающей для территории МП 1, 2 и 4 (см. рис. 1) является изреженная растительность. Отмечается тенденция к снижению площади густой растительности (см. рис. 2а, б, г). Для территории МП 3 и 5 ситуация более разнообразная. Преобладающей является густая растительность, но в 1979 г. на МП 3 доминировала изреженная растительность. Тем не менее в целом отмечается тенденция к постепенному увеличению площади густой растительности (см. рис. 2в). На юго-западе Ростовской области, на территории Усть-Донецкого района (МП 5), преобладающей является густая растительность в период с 1990 по 2010 г., и изреженная растительность в 1979 и 2020 гг. Отмечается тенденция к незначительному снижению площади густой растительности и, соответственно, увеличению площади изреженной (см. рис. 2д).

**Динамика состояния лесополос.** Для изучения состояния лесных полос на территории Ростовской области были выбраны два полигона, отличающиеся по особенностям рельефа, растительности и почвенного покрова: территория бывшего колхоза им. Кирова Песчанокопского района и совхоза “Заветинский” Заветинского района. Колхоз им. Кирова находится в степной зоне Ростовской области с преобладанием чернозёмов обыкновенных карбонатных (предкавказских) с различной степенью проявления плоскостной водной эрозии. Совхоз “Заветинский” расположен на границе сухостепной и полупустынной зон. Почвенный покров хозяйства представлен светло-каштановыми почвами, лугово-каштановыми

и солонцами каштановыми. Расчет площади лесных полос выполнялся с привлечением актуальных спутниковых снимков ESRI Imagery с пространственным разрешением 0.6–15 м/пиксель. Сравнение с архивными материалами за 1971–1979 гг. показало, что в совхозе “Заветинский” площадь лесополос за 41 год уменьшилась на 59 га (с 241 до 182 га), уменьшение площади составляет 24.5%. Скорость уменьшения площади лесополос в хозяйстве составляла 1.4 га в год. На территории колхоза им. Кирова Песчанокопского района в сравнении с 1972 г. площадь лесополос снизилась на 17.3 га, или на 2%.

Сокращение площадей, занятых лесополосами в рассмотренных хозяйствах, можно отнести к естественным причинам, таким как возраст деревьев, засушливый климат, особенности почвенного покрова. В совхозе “Заветинский” решающими факторами выпадения лесных полос являются также высокий процент почв с низким уровнем плодородия, обусловленным наличием солонцов в почвенном покрове, проявление процессов дефляции в светло-каштановых почвах. В то же время незначительное уменьшение площади лесополос в Песчанокопском районе можно связать с высоким уровнем почвенного плодородия чернозёмов обыкновенных. И следовательно, не только возраст лесных полос определяет их состояние и долговечность, но и окружающие условия: низкий уровень почвенного плодородия и засушливость климата способствуют гибели лесных полос.

## ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ архивных и актуальных данных по самой неблагоприятной территории Ростовской

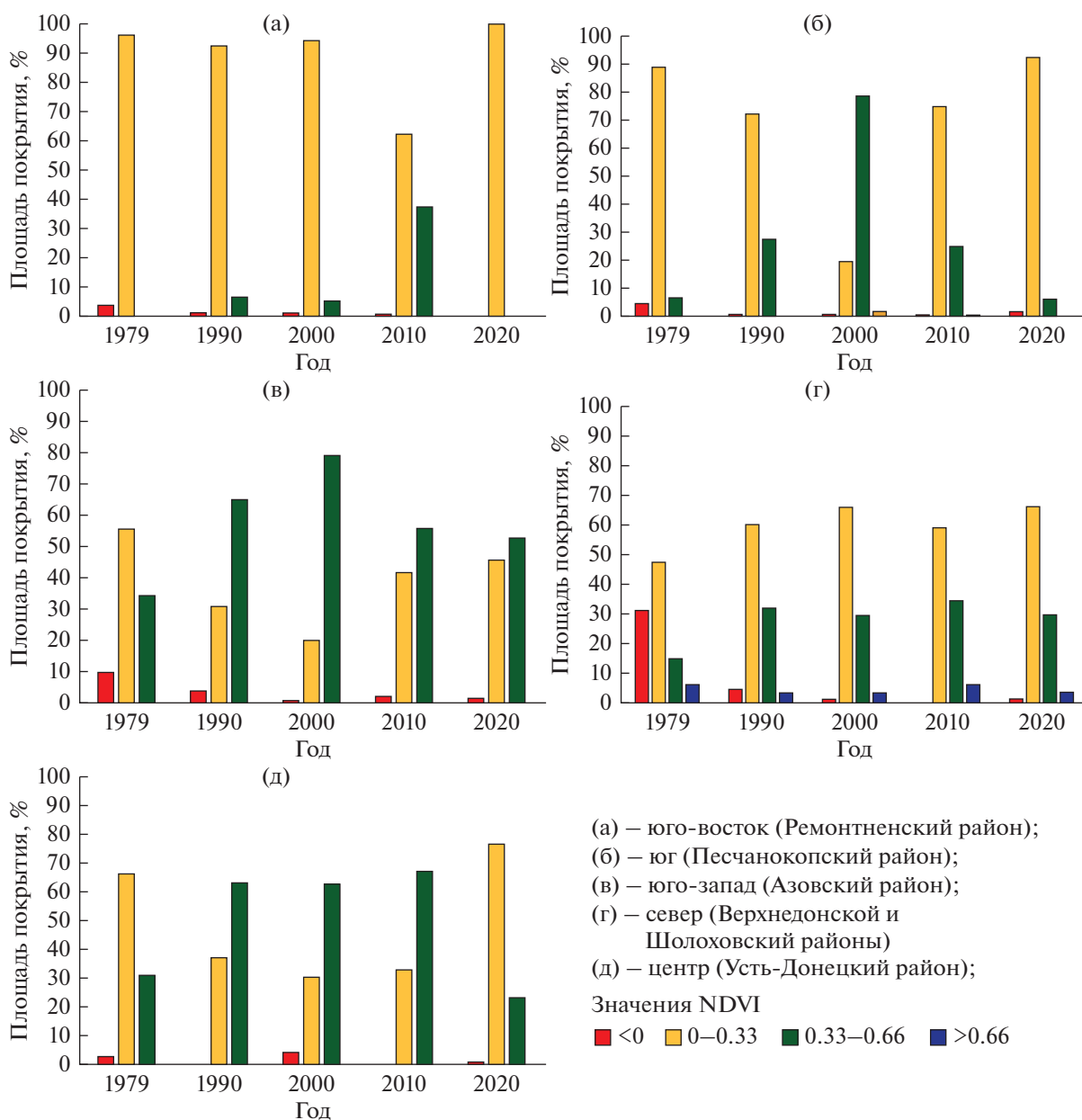


Рис. 2. Динамика состояния растительного покрова Ростовской области на мониторинговых площадках.

области — юго-востоку — показал, что по средне-многолетним данным биомасса и продуктивность сухостепного и полупустынного ландшафтов значительно уступают соответствующим показателям степного ландшафта, зона которого охватывает практически всю остальную часть области (табл. 4).

Биомасса сухостепного ландшафта в 1.4 раза меньше биомассы степного, а полупустынного — в 2.4 раза. Таким образом, по этому показателю, как и по данным, полученным с помощью ГИСТехнологий (см. рис. 2а), природные геосистемы юго-восточных районов области характеризуются

наиболее низкой устойчивостью. Данные по расчету индекса устойчивости природных ландшафтов, приведенные в табл. 5, свидетельствуют, что этот показатель для экосистем сухостепных и полупустынных ландшафтов значительно меньше, чем для ландшафтов степного типа.

В отличие от природных систем, обладающих различной степенью устойчивости, агроэкосистемы, как известно, относятся к категории неустойчивых, что подтверждается данными табл. 5 (Акимова, Хаскин, 1994). Величина индекса устойчивости пахотных агроэкосистем показывает, что юго-восточные районы по этому показате-

**Таблица 4.** Биомасса, продуктивность и индекс устойчивости природных ландшафтов

Тип ландшафта	Энергия поглощенной радиации, МДж/км <sup>2</sup> /год	Биомасса, т/км <sup>2</sup>	Продуктивность, т/км <sup>2</sup> /год	Индекс устойчивости
Полупустынный	2829	4	364	0.012
Сухостепной	2816	686	617	0.035
Степной	2641	960	864	0.073

Составлено по: (Закруткин и др., 2002а).

**Таблица 5.** Биомасса, продуктивность и индекс устойчивости сельскохозяйственных геосистем

Геосистемы												Средневзвешенный индекс устойчивости	
пахотные			многолетних насаждений			луговые			степные				
биомасса, т/км <sup>2</sup>	продуктивность, т/км <sup>2</sup> в год	индекс устойчивости	биомасса, т/км <sup>2</sup>	продуктивность, т/км <sup>2</sup> в год	индекс устойчивости	биомасса, т/км <sup>2</sup>	продуктивность, т/км <sup>2</sup> в год	индекс устойчивости	биомасса, т/км <sup>2</sup>	продуктивность, т/км <sup>2</sup> в год	индекс устойчивости		
Заветинский район													
549	359	0.016	4100	123	0.042	2447	350	0.071	522	470	0.020	0.019	
Ремонтненский район													
625	435	0.022	3800	114	0.036	–	–	–	576	518	0.024	0.023	
Дубовский район													
627	490	0.025	5809	174	0.084	3494	499	0.144	783	704	0.046	0.035	
Зимовниковский район													
575	409	0.020	6400	192	0.103	3864	552	0.177	751	676	0.042	0.032	
Зерноградский район													
951	643	0.054	11000	605	0.59	3220	460	0.130	960	864	0.073	0.091	
Ростовская область													
661	451	0.024	10550	522	0.48	2856	408	0.1	768	691	0.046	0.051	

лю уступают Зерноградскому району, где основой современных агроэкосистем выступает степной тип ландшафта, а также среднеобластному показателю. Наблюдается закономерное повышение индекса устойчивости пахотных агроэкосистем от Заветинского района (32% территории составляет полупустынный тип ландшафта) к Дубовскому (сухостепной тип). В соответствии с классификацией обобщенного индекса устойчивости (Закруткин и др., 2002а) агроэкосистемы восточных районов относятся к классу крайне неустойчивых. В целом агроэкосистемы области относятся к классу неустойчивых.

Интенсивность проявления перечисленных выше деградационных процессов связана не только с устойчивостью природных и агроэкосистем, но и с особенностями землепользования и землеустройства. В этих районах землепользование было направлено на создание крупных меха-

низированных хозяйств, что привело к упрощению технологии земледелия и подчинению его одной задаче – получению наиболее дешевым способом конечной продукции – зерна. Упор на зерновое полеводство отразился и на животноводческой отрасли, превращенной в придаток, а не в необходимый компонент аграрного производства, в том числе и для пополнения органических удобрений, без которых невозможно развитие интенсивного земледелия. Данное обстоятельство однозначно определило общее направление агрогенной эволюции этих систем в сторону биологической и физической деградации, антропогенного опустынивания, что сказывается на уровне продуктивности почв.

С запада на восток по мере уменьшения влагообеспеченности и значений почвенного бонитета изменяется урожайность сельскохозяйственных культур, в частности, озимой пшеницы – с 4.83 до





Рис. 3. Индекс аридности территории и урожайность озимой пшеницы.

2.53 т/га (рис. 3). Сравнительный анализ результатов оценки земель показывает, что наиболее плодородные земли имеет южная зона, балл бонитета которой равен 70 (Полужков, Цвылев, 2008). Наименее благоприятны условия для земледелия в восточной зоне, где дефицит увлажнения территории на 26% выше, балл бонитета снижается до 21 (Заветинский район), а средняя урожайность озимой пшеницы уменьшается почти вдвое. В этой связи показательна связь урожайности озимой пшеницы с индексом аридности по Стенцу, подтвержденная наивысшим значением достоверности аппроксимации  $R^2 = 0.9711$ .

Для межрегиональной оценки биологической продуктивности почв использовали величину биоклиматического потенциала (Шашко, 1985). Показатели оценки земли по природным агропроизводственным свойствам, определяющим ее биологическую активность, характеризуют землю со стороны ее природного БКП и степени его использования. Его величина дифференцируется в зависимости от типа почв, степени природной увлажненности территории и суммы положительных температур воздуха свыше  $10^{\circ}\text{C}$ , а также продуктивности сельскохозяйственных культур за ряд лет.

По данным табл. 6 ожидаемо выделился максимальный коэффициент роста продуктивности озимой пшеницы в Зерноградском районе ( $K_p = 0.97$ ), где сложились наилучшие условия для ее произрастания и формирования урожая при высоком балле бонитета почвы. Здесь же отмечен и наивысший биоклиматический потенциал террито-

рии (БКП = 3.44), превышающий таковой в остальных районах на 6–12%.

Такой же закономерности подчиняется и величина биоклиматического индекса, который возрастает от 168 баллов на востоке области до 172 и 178 в приазовской и центральной орошаемой зоне, достигая максимума 189 баллов в Южной зоне (см. табл. 6).

Цена балла биоклиматического индекса зависит от урожайности культуры, сложившейся под воздействием условий тепловлагообеспеченности и свойств почвенного покрова. Она варьирует от 15.1 кг в восточной зоне области до 25.5 кг в южной зоне. Показатели оценки земли по природным агропроизводственным свойствам, определяющим ее биологическую активность, характеризуют земли со стороны их природного биоклиматического потенциала, а показатели оценки использования земли – со стороны достигнутого уровня производства, экономического плодородия почвы, степени использования БКП. Сравнительная оценка степени использования БКП проведена с помощью шкалы биологической продуктивности по условиям климата (Шашко, 1985); в результате было выявлено, что на землях всех исследуемых объектов уровень плодородия охарактеризован как средний, за исключением Заветинского района, где уровень плодородия оценивается как пониженный.

Значительные резервы повышения урожайности культур демонстрируют результаты долговременных полевых опытов в приазовской и восточной сельскохозяйственных зонах. Так, на опытной станции “Красноармейская” в Орловском

**Таблица 6.** Сравнительная оценка использования биоклиматического потенциала территорий объектов исследований, в среднем за 2016–2020 гг.

Район, прилегающий к метеостанции	Тип почвы	Показатель					
		$K_p$	БКП	Бк	Цб, кг	балл бонитета	уровень плодородия
Аксайский	Чернозёмы обыкновенные	0.86	3.13	172	23.3	61	Средний
Мартыновский	Чернозёмы южные	0.89	3.23	178	22.2	51	Средний
Зерноградский	Чернозёмы обыкновенные	0.97	3.44	189	25.5	70	Средний
Зимовниковский	Каштановые	0.84	3.06	168	21.2	35	Средний
Заветинский	Светло-каштановые	0.84	3.08	168	15.1	21	Пониженный

*Примечание.*  $K_p$  – коэффициент роста урожайности озимой пшеницы, БКП – биоклиматический потенциал территории, Бк – биоклиматический индекс, Цб – цена балла биоклиматического индекса.

**Таблица 7.** Динамика содержания гумуса в пахотном горизонте почв по природно-сельскохозяйственным зонам (ПСХЗ) Ростовской области

ПСХЗ	Содержание гумуса, %									
	1960	1976– 1980	1981– 1985	1986– 1990	1991– 1995	1996– 2000	2001– 2005	2006– 2010	2011– 2015	2016– 2020
Северо-Западная	4.22	3.80	3.79	3.71	3.46	3.20	3.14	3.17	3.20	3.20
Северо-Восточная	3.46	3.10	3.10	3.00	2.90	2.80	2.73	2.74	2.70	2.63
Центральная	3.76	3.30	3.25	3.25	2.97	2.95	2.96	3.03	3.30	3.10
Приазовская	4.70	3.80	3.80	3.60	3.60	3.60	3.85	3.77	3.80	4.00
Южная	4.20	3.80	3.64	3.64	3.60	3.65	3.57	3.66	3.80	3.88
Восточная	2.84	2.80	2.73	2.40	2.22	2.40	2.33	2.35	2.20	1.60
Всего по области	3.86	3.43	3.39	3.27	3.17	3.11	3.10	3.12	3.20	3.10

районе (восточная зона) в среднем по плодосменному севообороту с многолетними травами и по зернопаропропашному севообороту максимальные весенние влагозапасы отмечены при безотвальной и нулевой обработке почвы (46.5 и 54.1 мм соответственно). Имеются опытные данные, согласно которым средние значения локальной дефляции на паровом поле опытного стационара составили в порядке убывания: при отвальной, безотвальной и нулевой обработках почвы соответственно 20.9; 9.2; 1.6 т/га (Кузнецов, Маркарова, 2014). Использование адаптивно-ландшафтного подхода указывает на возможность роста продуктивности зерновых, зерновых колосовых и кормовых культур, в том числе в восточной сельскохозяйственной зоне Ростовской области, имеющей наиболее низкий уровень почвенно-климатических ресурсов.

Одним из важнейших показателей почвенного плодородия является уровень гумусированности (табл. 7). По результатам восьми туров сплошного агрохимического обследования, проведенного в Ростовской области, установлено, что начиная с 2000-х годов, содержание гумуса в пахотном слое находится в определенном равновесии, характерном для биоклиматических и производственных

условий Ростовской области. С 1960 по 1990 г. наблюдалось медленное, но постоянное снижение содержания гумуса в пахотных почвах Ростовской области. В среднем по области это уменьшение было кратным 1.2 раза, в отдельных сельскохозяйственных зонах (северо-западная, центральная, приазовская) кратность снижения достигала 1.3. Начиная с 1990-х годов, установились равновесные условия для накопления и минерализации органического вещества в структуре севооборота с преобладанием колосовых культур, и снижение содержания гумуса прекратилось при условии отсутствия процессов эрозии.

Однако сложный рельеф predetermined широкое развитие эрозионных процессов на территории Ростовской области (рис. 4). В последнее десятилетие площади земель, подверженных эрозии, стабилизировались, причем водной эрозии подвержено 3793261.3 га, совместное действие водной и ветровой эрозии проявляется на 241036.7 га, ветровой эрозией охвачены 1017767.3 га<sup>7</sup>. Иными словами, проблема стоит очень остро и требует

<sup>7</sup> Государственный (национальный) доклад о состоянии и использовании земель в Российской Федерации в 2015 году / ред. В.В. Абрамченко и др. М.: Росреестр, 2016. 202 с.

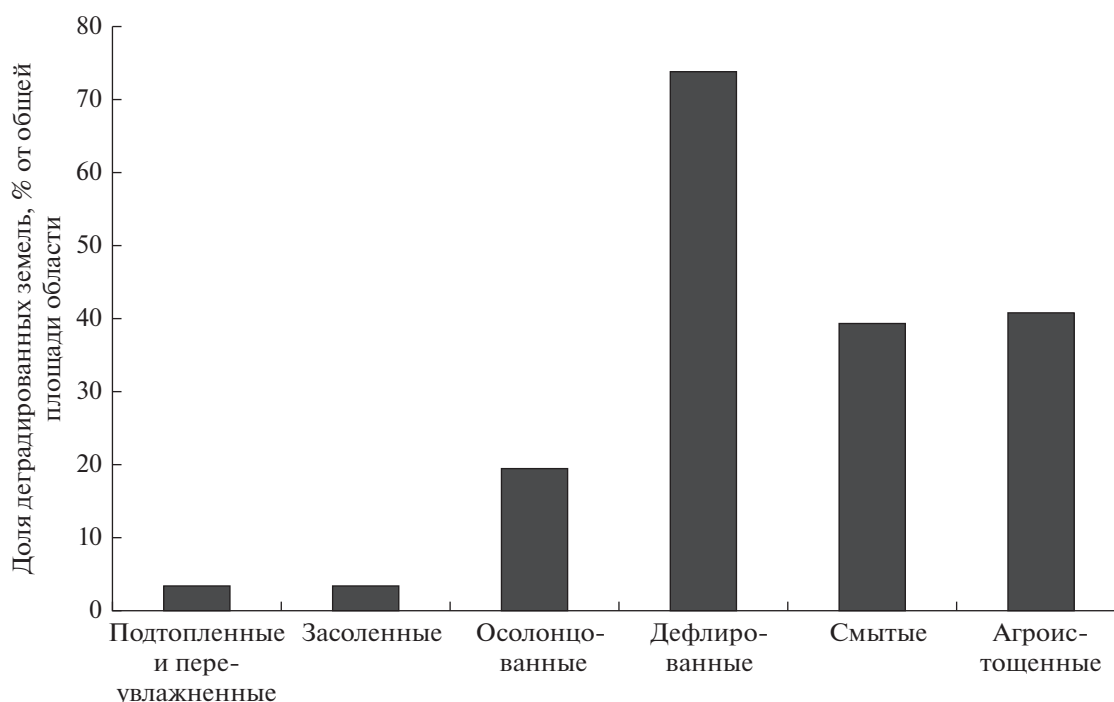


Рис. 4. Доля деградированных земель по их видам в площади Ростовской области, %.

постоянных наблюдений и мероприятий по стабилизации ситуации.

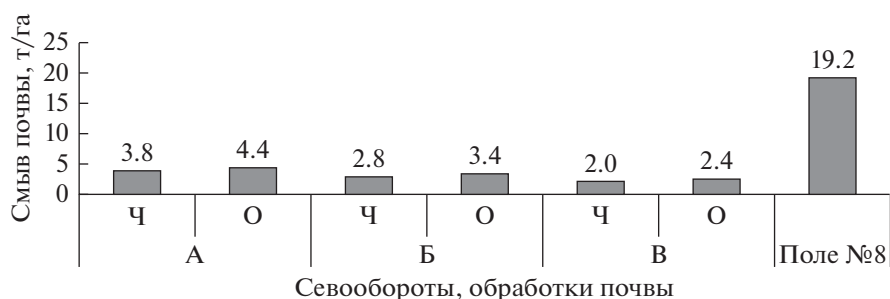
С целью изучения приемов защиты почв от водной эрозии учеными Донского зонального научно-исследовательского института сельского хозяйства в 1986 г. был заложен опытный стационар в приазовской сельскохозяйственной зоне на склоне чернозёмов обыкновенных, зарегистрированный в Географической сети опытов с удобрениями под № 169. На основе результатов этих полевых опытов предложен способ организации территории эрозионно-опасных склонов чернозёмов обыкновенных, обеспечивающий влагосбережение, защиту почв от водной эрозии и повышение продуктивности сельскохозяйственных культур. Способ заключается в контурно-полосном размещении полей конструкции севооборота (рис. 5).

Поле с уклоном  $3.5-4^\circ$  разбивается на полосы поперек длины склона и предполагает размещение на одном поле в полосах пяти культур с соблюдением принципа размещения на смежных полосах культур, обладающих различной степенью устойчивости к эрозионным процессам. Применение почвозащитных обработок почвы при контурно-полосной организации территории способствует снижению смыва почвы до  $4.4-2.0$  т/га в сравнении с незарегулированным склоном ( $19.2$  т/га). Наименьший смыв почвы ( $2.0$  т/га) отмечен при чизельной обработке почвы в севообороте с 40% многолетних трав в структуре севообо-

рота, что на 16% меньше, чем при отвальной. Снижение доли чистого пара в структуре севооборота до 10% способствовало сокращению смыва почвы в среднем по обработкам на 24.2%, а при отсутствии чистого пара и доле многолетних трав до 40% смыв почвы сокращался на 45.4%. Внедрение этого способа позволяет сократить смыв почвы до безопасных пределов ( $2.8-3.4$  т/га), повысить урожайность озимой пшеницы в 1.7 раза и повысить продуктивность севооборота на 3–5%. Использование чизельной обработки сокращает потери органического вещества почвы в севооборотах до 16.5 и 14.1% в сравнении с отвальной и в 5.3–9.1 раза в сравнении с контролем, что позволяет снизить затраты на восстановление почвенного плодородия на 86.9%.

## ВЫВОДЫ

1. Сравнительный анализ осредненных показателей аридности территории за периоды наблюдений 1961–1990 и 2016–2020 гг. по репрезентативным метеостанциям Ростовской области показал увеличение степени засушливости климата в ряде сельскохозяйственных зон в аспекте широтной зональности. Количество осадков уменьшилось за этот период времени на 19.8%, одновременно возросла испаряемость на 32.1%, дефицит увлажнения увеличился на 57.2%. Основные параметры, характеризующие процесс ариди-



**Рис. 5.** Средние показатели смыва почвы в период весеннего снеготаяния в зависимости от конструкции севооборотов и способов основной обработки почвы: Ч – чизельная вспашка, О – отвальная обработка. Структура севооборотов: А – зернопаропропашной, 20% чистый пар, без многолетних трав; Б – зернопаропропашной, 10% пара и без многолетних трав; В – зернопропашной, 40% многолетних трав, без пара. Поле № 8 – контроль, производственный участок с незарегулированным стоком, зернопропашной севооборот.

зации климата, также изменились в сторону увеличения: индекс аридности по Торнтвейту повысился на 18.8%, тот же показатель по Стенцу – на 64.9%. Коэффициент увлажнения, рассчитанный по Н.Н. Иванову, снизился на 33.3%.

2. Наблюдается закономерное повышение индекса устойчивости пахотных агроэкосистем от Заветинского района (32% территории составляет полупустынный тип ландшафта) к Дубовскому (сухостепной тип). В целом агроэкосистемы восточных районов Ростовской области относятся к классу крайне неустойчивых.

3. Анализ состояния растительного покрова территорий с естественной или мало измененной растительностью (сенокосов, пастбищ, особо охраняемых природных территорий) с использованием ГИС-технологий и расчетом индекса ND-VI показал тенденцию к преобладанию изреженной растительности на временном отрезке с 1979 по 2020 г. для мониторинговых площадок на юго-востоке, юге и севере Ростовской области. Для западной и центральной частей области тенденция обратная (увеличение площадей с густой растительностью), что, вероятно, обусловлено вторжением влажных масс со стороны Азовского моря.

4. Для юго-востока установлено снижение площади лесополос на 24.5% по сравнению с 1991 г. В степной зоне также наблюдается уменьшение площади, занятой лесополосами, но только на 2%. Это позволяет считать снижение площади лесополос одним из индикаторов изменения климата и рекомендовать его для оценки процессов опустынивания в полупустынной и сухостепной зонах.

5. Применение различных методов оценки степени засушливости климата констатирует общую тенденцию нарастания аридизации на территории Ростовской области, и особенно ее юго-востока, обусловленную не только природными,

но и антропогенными факторами, что диктует необходимость разработки специальных организационно-хозяйственных мероприятий по повышению увлажненности территории. Использование адаптивно-ландшафтного подхода в земледелии доказывает возможность сохранения влаги в почве, повышения ее плодородия и роста продуктивности сельскохозяйственных культур даже в условиях аридизации климата. А применение почвозащитных обработок почвы при контурно-полосной организации территории способствует снижению смыва почвы и существенному замедлению процессов водной эрозии.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Акимова Т.А., Хаскин В.В. Основы экоразвития. Учеб. пособие. М., 1994. 312 с.
- Безуглова О.С., Назаренко О.Г., Ильинская И.Н. Проблемы опустынивания, деградации земель и засух в Ростовской области // Национальный докл. “Глобальный климат и почвенный покров России: опустынивание и деградация земель, институциональные, инфраструктурные, технологические меры адаптации (сельское и лесное хозяйство)” / под ред. Р.С.-Х. Эдельгериева. М.: ООО “Изд-во МБА”, 2019. Т. 2. Раздел 4.1.2. С. 208–217.
- Булатов В.И., Игенбаева Н.О. Разработка экологических индикаторов устойчивого развития на региональном уровне // Вестн. Югорского гос. ун-та. 2008. Вып. 1 (8). С. 9–16.
- Голозубов О.М., Литвинов Ю.А., Колесникова В.М. Методическое пособие “Векторизация крупномасштабных почвенных карт”. М., 2020. 72 с. <https://soil-db.ru/nauchnaya-deyatelnost/publikacii> (дата обращения 15.06.2021).
- Закруткин В.Е., Рышков М.М., Цвылев Е.М., Шишкина Д.Ю. Агроэкосистемы в экстремальных природных условиях. Ростов-на-Дону: Изд-во СКНЦ ВШ, 2002а. 125 с.
- Закруткин В.Е., Рышков М.М., Шишкина Д.Ю., Цвылев Е.М. Агроэкосистемы влагодефицитных районов, их хозяйственная емкость и перспективы

- устойчивого функционирования // Изв. РАН. Сер. геогр. 2002б. № 3. С. 69–78.
- Золотокрылин А.Н., Черенкова Е.А., Туткова Т.Б.* Аридизация засушливых земель Европейской части России и связь с засухами // Изв. РАН. Сер. геогр. 2020. Т. 84. № 2. С. 207–217.  
<https://doi.org/10.31857/S258755662002017X>
- Иванов Н.Н.* Об определении величин испаряемости // Изв. ВГО. 1954. Т. 86. № 2. С. 189–196.
- Ильинская И.Н.* Нормирование орошения и продуктивности агроэкосистем на Северном Кавказе // РосНИИПМ. Ростов-на-Дону: СКНЦВШ, 2005. 112 с.
- Кузнецов Ю.Г., Маркарова Ж.Р.* Продуктивность севооборотов различных конструкций на каштановых почвах // Изв. Оренбург. гос. аграр. ун-та. Оренбург: Изд. Центр ОГАУ, 2014. № 5 (49). С. 28–31.
- Лурье П.М., Панов В.Д.* Река Дон: Гидрография и режим стока. Ростов-на-Дону: Донской издательский дом, 2018. 592 с.
- Полуэктов Е.В., Цвылев Е.М.* Почвенно-земельные ресурсы Ростовской области: монография. Новочеркасск: УПЦ “НАБЛА” ЮРГТУ (НПИ), 2008. 355 с.
- Селянинов Г.Т.* О сельскохозяйственной оценке климата // Тр. по сельскохоз. метеорологии. Вып. 20. Л., 1928. С. 165–177.
- Ускова Т.В.* Устойчивость развития территорий и современные методы управления // Проблемы развития территории. 2020. № 2 (106). С. 7–18.  
<https://doi.org/10.15838/ptd.2020.2.106.1>
- Хромов С.П., Мамонтова Л.И.* Метеорологический словарь. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 567 с.
- Шауко Д.И.* Учитывать биоклиматический потенциал // Земледелие. 1985. № 4. С. 19–26.
- Bengtsson J., Angelstam P., Elmqvist T., et al.* Reserves, Resilience and Dynamic Landscapes // A J. Human Environ. 2003. Vol. 32 (6). P. 389–396.  
<https://doi.org/10.1579/0044-7447-32.6.389>
- Bezuglova O.S., Nazarenko O.G., Ilyinskaya I.N.* Land Degradation Dynamics in Rostov Oblast // Arid Ecosys. 2020. Vol. 10. № 2. P. 93–97.  
<https://doi.org/10.24411/1993-3916-2020-10090>
- Cardinale B., Duffy J., Gonzalez A., et al.* Biodiversity loss and its impact on humanity // Nature. 2012. Vol. 486. № 7401. P. 59–67.  
<https://doi.org/10.1038/nature11148>
- Elizbarashvili N., Sulkhanishvili N., Elizbarashvili R.* Main concepts of Sustainable Development Mountainous Regions (On the example of the Caucasus) // Часопис соціально-економічної географії. 2018. Vol. 25. P. 66–74.  
<https://doi.org/10.26565/2076-1333-2018-25-06>
- Hector A., Schmid B., Beierkuhnlein C., Caldeira M.C., Diemer M., Dimitrakopoulos P.G., Finn J.A., Freitas H.* Plant diversity and productivity experiments in European grasslands // Sci. 1999. Vol. 286 (5442). P. 1123–1127.  
<https://doi.org/10.1126/science.286.5442.1123>
- Tilman D., Downing J.A.* Biodiversity and stability in grasslands // Nature. 1994. Vol. 367. P. 363–365.
- Sachs J.D., Kroll C., Lafortune G., Fuller G., Woelm F.* Sustainable Development Report 2021. Includes the SDG Index and Dashboards. The Decade of Action for the Sustainable Development Goals. Cambridge CB2 8BS, United Kingdom: Univ. Printing House, 2021. 505 p.  
<https://doi.org/10.1017/9781009106559>

## Dynamics of Land Degradation in Rostov Oblast

O. S. Bezuglova<sup>1</sup>\*, I. N. Ilyinskaya<sup>2</sup>, V. E. Zakrutkin<sup>1</sup>, O. G. Nazarenko<sup>3</sup>, Yu. A. Litvinov<sup>1</sup>,  
E. A. Gayevaya<sup>2</sup>, A. A. Mezhenkov<sup>1</sup>, and A. I. Zhumbey<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

<sup>2</sup>Federal Agrarian Scientific Center of Rostov-on-Don, village Rassvet, Russia

<sup>3</sup>State Center of Agrochemical Service “Rostovsky,” village Rassvet, Russia

\*e-mail: lola314@mail.ru

Our research concentrates on the stability assessment of geosystems (including agroecosystems) in Rostov oblast. The southeast area of the region is considered the most vulnerable and was selected to conduct calculations on the degradation processes in comparison with the average indicators for the region. We provide a comparative assessment of aridity in the spatio-temporal aspect, including values for the moisture deficit, one of the main indicators of aridity in general. The aridity index, determined using various calculation methods based on data from representative meteorological stations, has shown that the degree of aridity increased in all areas of the region, which indicates a general trend towards an increase in climate aridity. Based on archived and current satellite images we calculated the vegetation index NDVI, and subsequently evaluated changes in the state of natural vegetation cover of Rostov oblast: sparse vegetation is predominant for the southern, southeastern, and northern parts of the region, and a tendency towards a decrease in areas with dense vegetation is noted. In the western and central parts of the region, there is a tendency towards a gradual increase in the area of dense vegetation. In the soils of agricultural landscapes, according to the results of a continuous agrochemical survey, it was found that from 1960 to 2000 there was a gradual decrease in the humus content, the rate of decrease over 40 years was 1.2–1.3. Since the 2000s, the humus content in the arable layer has been in a certain equilibrium, characteristic of the bioclimatic and production conditions of Rostov oblast, in the absence of erosion processes, a decrease in the humus content is not observed. Furthermore, we were able to assess the state of forest shelter belts using the same satellite images, and with the additional

help of archival soil surveys from the Southern Research Institute of State Land Design. We consider a decrease of forest shelter belts to be one of the contributing indicators to the climate change process. Therefore, we suggest using this indicator for assessing various desertification processes.

**Keywords:** soil degradation, desertification, NDVI index, climate aridization, assessment of ecosystem sustainability

## REFERENCES

- Akimova T.A., Khaskin V.V. *Osnovy ekorazvitiya* [Eco-Development Fundamentals]. Moscow: 1994. 312 p.
- Bengtsson J., Angelstam P., Elmqvist T. et al. Reserves, resilience and dynamic landscapes. *AMBIO*, 2003, vol. 32, no. 6, pp. 389–396.  
<https://doi.org/10.1579/0044-7447-32.6.389>
- Bezuglova O.S., Nazarenko O.G., Il'inskaya I.N. Land degradation dynamics in Rostov Oblast. *Arid Ecosyst.*, 2020, vol. 10, no. 2, pp. 93–97.  
<https://doi.org/10.1134/S207909612002002X>
- Bezuglova O.S., Nazarenko O.G., Il'inskaya I.N. Problems of desertification, land degradation and droughts in the Rostov region. In *Natsional'nyi doklad "Global'nyi klimat i pochvennyi pokrov Rossii: opustynivanie i degradatsiya zemel', institutsional'nye, infrastrukturalnye, tekhnologicheskie mery adaptatsii (sel'skoe i lesnoe khozyaistvo)"* [National Report "Global Climate and Soil Cover of Russia: Desertification and Land Degradation, Institutional, Infrastructural, Technological Adaptation Measures (Agriculture and Forestry)"]. Ed. Edel'geriev R.S.-Kh., Ed. Moscow: MBA Publ., 2019, vol. 2, pp. 208–217. (In Russ.).
- Bulatov V.I., Igenbaeva N.O. Designing environmental indicators of sustainable development at the regional level. *Vestn. Yugorskogo Gos. Univ.*, 2008, no. 1 (8), pp. 9–16. (In Russ.).
- Cardinale B., Duffy J., Gonzalez A. et al. Biodiversity loss and its impact on humanity. *Nature*, 2012, vol. 486, no. 7401, pp. 59–67.  
<https://doi.org/10.1038/nature11148>
- Elizbarashvili N., Sulkhaniashvili N., Elizbarashvili R. Main concepts of sustainable development of mountainous regions (on the example of the Caucasus). *Chasopis Sotsial'no-Ekonomichnoi Geografii.*, 2018, vol. 25, pp. 66–74. (In Ukr.).
- Golozubov O.M., Litvinov YU.A., Kolesnikova V.M. *Vektorizatsiya krupnomasshtabnykh pochvennykh kart. Metodicheskoe posobie* [Vectorization of Large-scale Soil Maps. Toolkit]. Moscow, 2020. 72 p. Available at: <https://soil-db.ru/nauchnaya-deyatelnost/publikacii> (accessed: 15.06.2021). (In Russ.).
- Hector A., Schmid B., Beierkuhnlein C., Caldeira M.C., Diemer M., Dimitrakopoulos P.G., Finn J.A., Freitas H. Plant diversity and productivity experiments in European grasslands. *Science*, 1999, vol. 286, no. 5442, pp. 1123–1127.  
<https://doi.org/10.1126/science.286.5442.1123>
- Il'inskaya I.N. *Normirovanie orosheniya i produktivnosti agroekosistem na Severnom Kavkaze* [Rationing of Irrigation and Productivity of Agroecosystems in the North Caucasus]. Rostov-on-Don: RosNIIPM, 2005. 112 p.
- Ivanov N.N. Determination of the values of volatility. *Izv. VGO*, 1954, vol. 86, no. 2, pp. 189–196. (In Russ.).
- Khromov S.P., Mamontova L.I. *Meteorologicheskii slovar'* [Meteorological Dictionary]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1974. 567 p.
- Kuznetsov Yu.G., Markarova Zh.R. The productivity of crop rotations of various designs on Kashtanozems. *Izv. Orenburg. Gos. Agrar. Univ.* 2014, no. 5 (49), pp. 28–31. (In Russ.).
- Lur'e P.M., Panov V.D. *Reka Don: Gidrografiya i rezhim stoka* [Don River: Hydrography and Flow Regime]. Rostov-on-Don: Donskoi Izd. Dom, 2018. 592 p.
- Poluektov E.V., Tsvylev E.M. *Pochvenno-zemel'nye resursy Rostovskoi oblasti* [Soil and Land Resources of the Rostov Region]. Novochechensk: UPTs "NABLA" YURGTU (NPI), 2008. 355 p.
- Sachs J.D., Kroll C., Lafortune G., Fuller G., Woelm F. *The Decade of Action for the Sustainable Development Goals: Sustainable Development Report 2021*. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2021. 505 p.  
<https://doi.org/10.1017/9781009106559>
- Selyaninov G.T. On agricultural climate assessment. *Tr. po S-kh. Meteorol.*, 1928, no. 20, pp. 165–177. (In Russ.).
- Shashko D.I. Considering bioclimatic potential. *Zemledelie*, 1985, no. 4, pp. 19–26. (In Russ.).
- Tilman D., Downing J.A. Biodiversity and stability in grasslands. *Nature*, 1994, vol. 367, pp. 363–365.
- Uskova T.V. Sustainable development of the territory and modern management methods. *Probl. Razvitiya Territorii*, 2020, no. 2 (106), pp. 7–18. (In Russ.).  
<https://doi.org/10.15838/ptd.2020.2.106.1>
- Zakrutkin V.E., Ryshkov M.M., Shishkina D.Yu., Tsvylev E.M. Agroecosystems of moisture-deficient areas, their economic capacity and prospects for sustainable functioning. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2002b, no. 3, pp. 69–78. (In Russ.).
- Zakrutkin V.E., Ryshkov M.M., Tsvylev E.M., Shishkina D.Yu. *Agroekosistemy v ekstremal'nykh prirodnykh usloviyakh* [Agroecosystems in Extreme Natural Conditions]. Rostov-on-Don: SKNTs VSh Publ., 2002a. 125 p.
- Zolotokrylin A.N., Cherenkova E.A., Titkova T.B. Aridization of drylands in the European part of Russia: Secular trends and links to droughts. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2020, vol. 84, no. 2, pp. 207–217. (In Russ.)  
<https://doi.org/10.31857/S258755662002017X>

## ПРОБЛЕМЫ ДЕГРАДАЦИИ ЗЕМЕЛЬ И УСТОЙЧИВОГО ЗЕМЛЕПОЛЬЗОВАНИЯ

УДК 634.434.52

### МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ И ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ОЦЕНКИ ДЕГРАДАЦИИ ЗЕМЕЛЬ/ПОЧВ БЕЛАРУСИ

© 2022 г. А. Н. Червань<sup>a, b, \*</sup>, Н. Н. Цыбулько<sup>a</sup>, В. М. Яцухно<sup>b, \*\*</sup>

<sup>a</sup>Институт почвоведения и агрохимии Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

<sup>b</sup>Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

\*e-mail: ChervanAlex@mail.ru

\*\*e-mail: yatsukhno@bsu.by

Поступила в редакцию 22.07.2021 г.

После доработки 23.08.2021 г.

Принята к публикации 12.10.2021 г.

В статье отражен многолетний опыт научных исследований определения роли и влияния биофизических, социально-экономических и территориально-организационных факторов на проявление деградационных процессов земель (включая почвы) и их эколого-экономические последствия в Республике Беларусь. Предложена научно обоснованная система национальных критериев и индикаторов деградации земель, гармонизированных со стратегическими целями реализации Конвенции ООН по борьбе с опустыниванием (КБО ООН). Подробно изложена разработанная научно-методическая база, используемая при выявлении, картографировании, оценке состояния и ведении мониторинга земель (почв), подверженных водной и ветровой эрозии, ускоренной трансформации органогенных (торфяных) почв, радиационно загрязненных сельскохозяйственных земель, земель нарушенных при добыче торфа и песчано-гравийных смесей, расширения транспортной инфраструктуры. Процессы деградации земель в Беларуси соотнесены с методическими подходами и практическим применением мероприятий по их преодолению в аспекте действующей законодательной базы и технических нормативно-правовых актов. Рассмотрены территориальные аспекты проявления процессов деградации почвенно-земельных ресурсов с учетом почвенно-экологического районирования и административно-территориального устройства Республики Беларусь. Приводятся примеры практического использования результатов оценки деградации земель при подготовке Стратегии и Национального плана действий, направленных на ее предотвращение, достижение нейтрального (нулевого) баланса деградации земель и их восстановления, обосновании и внедрении инновационных агротехнологий, совершенствовании территориально-планировочных мероприятий, смягчении последствий изменения климата. Предложена система мероприятий по совершенствованию нормативно-правового, институционального и научно-методического обеспечения для успешного решения проблемы, связанной с предотвращением и борьбой с деградацией земель/почв в республике.

*Ключевые слова:* деградация земель/почв, землепользование, виды деградации земель/почв, критерии и индикаторы, научно-методическое обеспечение

DOI: 10.31857/S2587556622010058

#### ВВЕДЕНИЕ

В Республике Беларусь, не отличающейся богатыми запасами полезных ископаемых, в том числе углеводородного сырья, почвенно-земельные ресурсы играют первостепенную роль в социально-экономическом развитии страны, сохранении и устойчивом функционировании наземных экосистем, предоставляющих широкий спектр выгод и благ. Однако в последние несколько десятилетий острую тревогу вызывают проявления процессов деградации земель/почв, что обусловлено, в первую очередь, факторами антропогенного характера — несбалансирован-

ным интенсивным землепользованием, усиливающим техногенное загрязнение почв; частым несоблюдением норм законодательства и технологических регламентов по охране и использованию земель. Кроме того, процессы деградации земель усугубляются экстремальными климатическими явлениями, особенно засухами, заморозками, переувлажнением, проявление которых негативно отражается на структурно-функциональных свойствах почв и в целом ландшафтов.

Долгие годы важнейшим приоритетом земельной политики в республике являлась рациональность использования земель сельскохозяйственного

назначения. Однако она была связана с площадью землепользования (землевладения), освоенностью территории (долей сельскохозяйственных земель в общей площади), распаханностью (долей пашни в площади сельскохозяйственных земель), составом и структурой посевов, урожайностью сельскохозяйственных культур и т.д. Эти же показатели использовались для оценки результатов исключительно хозяйственной деятельности предприятий, формирования отчетных показателей, планирования развития производства и распределения ресурсов. Изложенная система приоритетов была предпосылкой и теоретическим обоснованием для широкомасштабного освоения и вовлечения в сельскохозяйственный оборот все новых и новых земель и их пространственного укрупнения. В результате этого общая площадь сельскохозяйственных земель составила 40,8% территории республики (на одного жителя страны приходится 0,95 га). По этим показателям Беларусь занимает одно из ведущих мест в Европе (Природа ..., 2020).

Во многих случаях эти действия не выдерживают критики ни с экономической, ни с экологической точки зрения: развивался ряд негативных тенденций (уменьшение плодородия почв, усиление водной и ветровой эрозии, проявление химического и радиоактивного загрязнения, дисбаланса гумуса, коренная трансформация осушенных торфяных почв, усиление внутривидовой неоднородности почвенного покрова и др.).

В контексте актуальности и необходимости принятия мер, направленных на предотвращение разрушения земель, и разделяя тревогу за состояние земельных ресурсов в мире, Республика Беларусь согласно Указу Президента Республики Беларусь от 17 июля 2001 г. № 393 присоединилась к Конвенции ООН по борьбе с опустыниванием. При этом было подчеркнуто, что сохранение земель (включая почвы) и их эффективное использование и охрана являются одним из приоритетных направлений политики устойчивого развития и обеспечения экологической безопасности государства. В принятой в 2010 г. Конвенции национальной безопасности деградация земель, лесов и природных комплексов, радиоактивное, химическое и биологическое загрязнение почв, земель признаны одними из основных угроз национальной безопасности<sup>1</sup>, их предотвращение является приоритетным направлением государственной политики в области охраны окружающей среды на период до 2025 г. (Стратегия ..., 2011). Актуальность вопросов деградации земель отмечена в Национальной стратегии устойчивого социально-экономического развития Республи-

ки Беларусь на период до 2030 года, одобренной Президиумом Совета Министров Республики Беларусь 10 февраля 2015 г.

Все это заметно стимулировало разработку научно-методической и создание информативно-аналитической базы определения унифицированных подходов при выделении, классификации, картографировании и оценке процессов деградации земель и, самое главное, обосновании практических мероприятий по защите земель (включая почвы) от проявления на них процессов деградации.

Целью настоящей работы является соотнесение процессов деградации земель в Беларуси с методическими подходами и практическим применением мероприятий по их преодолению в аспекте действующей законодательной базы и технических нормативно-правовых актов. Критерии и показатели оценки деградации земель/почв основаны на результатах многолетних научно-исследовательских и производственных работ в Институте почвоведения и агрохимии и Институте мелиорации Национальной академии наук Беларуси, Белорусском государственном университете и Белорусской государственной сельскохозяйственной академии, проектных институтах Белгипрозем и Белгипроводхоз.

## СТРУКТУРИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ДЕГРАДАЦИИ ЗЕМЕЛЬ И ОЦЕНОЧНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ СТЕПЕНИ ИХ ПРОЯВЛЕНИЯ

Несмотря на то, что вопросы деградации земель, а также определение мероприятий по достижению цели устойчивого землепользования в Беларуси уже довольно длительное время обсуждаются и нашли отражение в ряде научных исследований (Методические ..., 1998; Червань, 2020; Яцухно, 2003), до недавнего времени в отечественных законодательных актах, инструктивно-технологических документах и научно-методической литературе отсутствовали какие-либо единые унифицированные определения в области деградации земель, обоснованные критерии для выделения и классификации соответствующих процессов и вытекающих последствий, а также методы и порядок сбора, обработки, хранения и использования данных о них.

В первую очередь были упорядочены и законодательно закреплены такие термины и понятия, как “деградация земель”, “деградированные земли”, “земля (земли)”<sup>2</sup>. Слово “деградация”, как известно, означает ухудшение или утрату исходных свойств, т.е. снижение качества, а также переход в связи с этим на более низкий качественный уровень в соответствии с принятой градаци-

<sup>1</sup> Об утверждении Концепции национальной безопасности Республики Беларусь. Национальный реестр правовых актов Республики Беларусь, 2010. № 276–1/12080.

<sup>2</sup> Кодекс Республики Беларусь о земле. Национальный реестр правовых актов Республики Беларусь, 2008. № 187–2/1522.



ей. Термин “качество” используется чаще всего в двух значениях: как совокупность свойств, обуславливающих способность удовлетворять определенные потребности в соответствии с назначением вещи, продукции, услуги, товара и т.д., и как совокупность признаков, свойств и особенностей, отличающих один предмет или явление от других<sup>3</sup>. На наш взгляд, первое значение целесообразно использовать применительно к деградации как процессу, а второе — к его результату, полагая, что в процессе деградации качество в итоге принимает дискретные значения, обусловленные новыми свойствами объекта, и предопределяет перевод его на другой, более низкий уровень (единицу) градации.

С учетом изложенного даны следующие определения. *Деградация земель* — процесс снижения качества земель в результате вредного антропогенного и (или) природного воздействия; *деградированные земли* — земли, потерявшие в результате деградации свои исходные полезные свойства до состояния, исключающего возможность их эффективного использования по целевому назначению.

Процессы деградации целесообразно рассматривать и оценивать по определенным критериям и показателям в первую очередь внутри одной категории и вида земель, а факт их деградации должен означать необходимость отнесения (перевода) их в другие категории и виды (подвиды, разновидности). Иначе невозможно установить критерии выявления процессов деградации земель и отнесения земель к деградированным (Помелов, 2006).

Для определения сущности проявления процессов деградации земель, их изучения и анализа, разработки и обоснования мероприятий по предотвращению деградации и восстановлению деградированных земель их следует дифференцировать в зависимости от свойств земли и его ключевого компонента — почвы, на которые влияют процессы деградации в каждом конкретном случае. Перспективен подход типизации объектов землепользования (землеустройства) для определения иерархии требуемых противодеградационных мероприятий: в Российской Федерации идентифицированы 15 адаптивных систем землепользования, направленных на нейтрализацию процессов деградации земель (Andreeva et al., 2021). Все это позволило выделить на территории Беларуси 20 видов деградации земель (почв) (Стратегия ..., 2015), из которых к наиболее опасным и территориально выраженным отнесены: 1) водная эрозия почв; 2) дефляция почв; 3) минерализация (разрушение) осушенных торфяных почв; 4) радиационное загрязнение почв в результате аварии на Черно-

быльской АЭС; 5) выгорание осушенных торфяников (пирогенная деградация) земель; 6) загрязнение земель (включая почвы) химическими и иными веществами; 7) переуплотнение почв; 8) подтопление и заболачивание земель; 9) нарушение земель (включая почвы) при разработке месторождений (добыче) полезных ископаемых и их переработке, при проведении строительных и иных работ.

Приведенный перечень преобладающих видов деградации почвенно-земельных ресурсов Беларуси является типичным для стран Центральной и Восточной Европы (Soil ..., 2016). При многообразии видов деградации земель на территории Беларуси возникла безотлагательная необходимость разработки и официального утверждения технологического нормативно-правового акта, регулирующего и определяющего выявление, картографирование, оценку и учет процессов деградации земель (почв), а также выполнение контроля за использованием и охраной земель и осуществление мероприятий по восстановлению деградированных земель. В результате совместных усилий научного сообщества республики был разработан такой документ — технический кодекс установившейся практики (ТКП), определяющий порядок выполнения работ по определению деградации земель (почв), включая перечень критериев и индикаторов, характеризующих степень различных видов деградации земель (почв) (табл. 1).

Изложенный в ТКП порядок и правила работ по определению деградации земель (почв), а также установление степени их деградации является обязательным при:

- крупномасштабном почвенном обследовании земель или корректировке почвенных материалов, осушенных и прилегающих к ним земель;
- агрохимическом обследовании сельскохозяйственных земель сельскохозяйственных организаций;
- радиологическом обследовании земель;
- сличении материалов земельно-информационной системы (ЗИС) с актуальными данными ДЗЗ при ведении (эксплуатации) ЗИС;
- разработке проектов внутрихозяйственного землеустройства;
- разработке схем землеустройства административных районов;
- инвентаризации мелиоративных систем и (или) отдельно расположенных гидротехнических сооружений;
- разработке проектов реконструкции мелиоративных систем и (или) отдельно расположенных гидротехнических сооружений;
- осуществлении контроля за использованием и охраной земель, а также по результатам проведения мониторинга, мероприятий технического

<sup>3</sup> Кодекс Республики Беларусь о земле. Национальный реестр правовых актов Республики Беларусь, 2008. № 187—2/1522.

**Таблица 1.** Виды (формы), критерии оценки и показатели степени деградации земель (почв)

Вид (форма) деградации земель (почв)	Критерии оценки степени деградации земель (почв)	Показатели степени деградации*			
		1	2	3	4
1. Водная эрозия почв	Уменьшение мощности** плодородного (гумусированного) слоя почвы, %***	10–25	>25–50	>50–75	>75
	Появление, увеличение глубины промоин, рытвин и провалов относительно поверхности земли, см	21–40	>40–100	>100–200	>200
	Появление или увеличение мощности** абиотического (неплодородного) наноса, см	3–10	>10–20	>20–40	>40
	Содержание гумуса, %***	1.80–1.30	1.29–1.00	0.99–0.70	0.69–0.40
2. Ветровая эрозия (дефляция) почв	Запасы гумуса, т/га***	49–35	<35–20	<20–10	<10
	Уменьшение мощности** плодородного (гумусированного) слоя почвы, %	10–25	>25–50	>50–75	>75
3. Минерализация (разрушение) осушенных торфяно-болотных почв	Появление или увеличение мощности** абиотического (неплодородного) наноса, см	3–10	>10–20	>20–40	>40
	Уменьшение мощности торфяного слоя, см в год	2–4	>4–6	>6–8	>8
4. Радионуклидное загрязнение почв	Уменьшение мощности** торфяного слоя, %	10–30	>30–50	>50–80	>80
	Содержание органического вещества в слое 0–20 см, %	<50–30	<30–10	<10–5	<5
5. Выгорание осушенных торфяников (пирогенная деградация земель)	Плотность загрязнения почв, Ки/км <sup>2</sup> : Цезием-137	1.0–4.9	>4.9–9.9	>9.9–15.0	>15.0
	Стронцием-90	0.15–0.30	>0.30–0.50	>0.50–1.0	>1.0
6. Загрязнение земель (включая почвы) химическими и иными веществами	Уничтожение, нарушение органогенных горизонтов у осушенных торфяников вследствие их выгорания	Очень высокая степень деградации			
	Превышение норматива предельно допустимой концентрации химических и иных веществ, кратность, раз	>1–5	>5–20	>20–50	>50
7. Переуплотнение почв	Превышение показателя фоновой концентрации при отсутствии установленного норматива предельно допустимой концентрации химических и иных веществ, кратность, раз	>2–10	>10–40	>40–100	>100
	Увеличение равновесной плотности пахотного горизонта, % от исходного	11–20	>20–30	>30–40	>40
8. Подтопление и заболачивание сельскохозяйственных земель	Повышение** среднесуточного уровня залегания грунтовых вод, расстояние до поверхности земли, м	0.65–0.50	<0.50–0.35	<0.35–0.20	<0.20
	Доля площади контура (контуров) сельскохозяйственных земель с погибшей растительностью и (или) с появившейся (увеличившей удельный вес) влаголюбивой (болотной) растительностью в площади земельного контура или земельного участка, %	5–15	>15–40	>40–70	>70
9. Нарушение земель при разработке месторождений (добыче) полезных ископаемых и их переработке, проведении строительных и иных работ	Снятие, уничтожение, нарушение (в том числе в результате нанесения слоя неплодородного грунта) плодородного слоя почвы	Очень высокая степень деградации			

\* 1 – низкая степень деградации; 2 – средняя степень деградации; 3 – высокая степень деградации; 4 – очень высокая степень деградации.

\*\* По сравнению со значением показателя по данным предыдущих обследований.

\*\*\* Применяется для минеральных почв.

Составлено по: ТКП 17.03-05-2018 Охрана окружающей среды и природопользование. Земли. Порядок выполнения работ по определению деградации земель (почв). Минск, 2018. 18 с.

**Таблица 2.** Критерии и индикаторы (показатели) степени деградации торфяных почв, используемых в сельскохозяйственных целях

Критерий	Степень деградации*				
	0	1	2	3	4
Уменьшение мощности органогенного слоя, см/год	<0.3	0.3–0.8	0.8–2.5	2.5–4.0	>4.0
Уменьшение мощности органогенного слоя, % от исходного	<10	10–30	30–50	50–80	>80
Содержание органического вещества (ОВ) в слое 0–20 см, %	>50	50.0–30.1	30.0–10.1	10.0–5.0	<5
Зольность в слое 0–20 см, %	<50	50.0–69.9	70.0–89.9	90.0–95.0	>95
Уровень грунтовых вод, м	0.5–0.8	0.8–1.1	1.1–1.5	1.5–2.0	>2.0
Плотность (0–20 см слоя), г/см <sup>3</sup>	<0.5	0.5–0.7	0.7–0.9	0.9–1.3	>1.3
Снижение продуктивности сельскохозяйственных культур, %	0–5	5–25	25–50	50–80	>80
Потери органического вещества торфа, т/га	<10.0	10–35	35–75	75–90	>90
Выброс CO <sub>2</sub> в атмосферу, т/га в год	<5.0	5–15	15–35	35–45	>45

\* 0 – нулевая; 1 – низкая; 2 – средняя; 3 – высокая; 4 – очень высокая.

(технологического, поверочного) характера, полевых мероприятий;

– осуществлении аналитического (лабораторного) контроля в области охраны окружающей среды, производственного контроля и обследования земель (включая почвы) для определения их загрязнения химическими веществами;

– проведении научных исследований.

Учитывая актуальность и практическую востребованность предотвращения деградации и восстановления деградированных мелиорированных, особенно торфяных почв сельскохозяйственных земель Беларуси, дополнительно был разработан и успешно применяется ТКП, посвященный решению этой проблемы<sup>4</sup>. На основании обобщения огромного экспериментального материала, накопленного в результате многолетних наблюдений за трансформацией торфяных почв, был расширен перечень показателей, характеризующих степень их деградации (Черныш, 2016) (табл. 2).

Известно, что процессы деградации земель и интенсивность их проявления предопределяются различными видами антропогенных нагрузок на почвенный покров (Деградация..., 2002), что требует выявления и экологического нормирования состояния почв и воздействия на них (Евдокимова, 2013), в том числе с использованием современных геоинформационных технологий (Червань, 2013).

В системе экологического нормирования особо следует выделить принцип адаптированности, использование которого предполагает приспособ-

ление его методов и задач к устойчивости почв к антропогенному воздействию, а также к изменяющимся внешним условиям, как естественным, так и техногенным. Реализация адаптации нормативов антропогенного влияния на фоне динамики естественных условий предусматривает проведение мониторинговых наблюдений. В Республике Беларусь оценка состояния почв агрофитоценозов по агрофизическим критериям выполняется на основе приведенных в табл. 3 оптимальных, допустимых, неудовлетворительных или критических значений. В качестве основных физических показателей, являющихся наиболее информативными для характеристики физического состояния почв, используются плотность сложения почвы, ее структурное состояние и водно-физические свойства.

Таким образом, для оценки степени деградации почв и земель предлагается использовать градации показателей состояния почв, характерные для отдельных типов деградации и унифицированные по уровням потери природно-хозяйственной значимости земель. В случае если разные типы деградации имеют аналогичные показатели, определения их значений производятся для диагностики каждого типа деградации с учетом специфики конкретного процесса в соответствии с перечнем возможных типов деградации. Деградация почв и земель по каждому показателю характеризуется пятью степенями: 0 – недеградированные (ненарушенные); 1 – слабодеградированные (низкая степень деградации); 2 – среднедеградированные (средняя); 3 – сильнодеградированные (высокая); 4 – очень сильнодеградированные (разрушенные – очень высокая степень деградации).

На основе имеющихся экспериментальных данных степени деградации соизмерены с уровнями потери природно-хозяйственной значимости почв сельскохозяйственных земель:

<sup>4</sup> ТКП 17.03-04-2014 (02120) Охрана окружающей среды и природопользование. Земли. Предотвращение деградации и восстановление деградированных мелиорированных нарушенных сельскохозяйственных земель. Общие положения. Минск, 2014. 22 с.

**Таблица 3.** Показатели агрофизических свойств и морфологические признаки почв земель сельскохозяйственного назначения

Показатель*	Критерий оценки состояния			
	оптимальное	допустимое	неудовлетворительное	критическое
<b>Морфологические</b>				
Мощность Ап, см	Более 30	20–30	10–20	Менее 10
Мощность АТп, см	Стабильный	Уменьшен, менее 1 см/год	Уменьшен, 2–3 см/год	Полная минерализация
<b>Агрофизические</b>				
Плотность Ап, г/см <sup>3</sup>	Менее 1.10	1.20–1.30	1.40–1.50	Более 1.50
Плотность А <sub>2</sub> , г/см <sup>3</sup>	Менее 1.30	1.40–1.50	1.60–1.70	Более 1.70
Плотность Ап	Суглинистые	1.10–1.30	1.30–1.35	1.43–1.55
	Супесчаные	1.30–1.40	1.40–1.45	1.50–1.60
	Песчаные	1.40–1.50	1.50–1.55	1.55–1.63
	Торфяные (осушенные)	0.20–0.30	0.30–0.40	0.40–0.50
Порозность Ап, %	60–53	53–47	47–42	Менее 42
Порозность Ап, %	55–50	50–45	45–40	Менее 40
Содержание водопрочных агрегатов, %	Более 55	55–40	40–20	Менее 20

\* Ап – пахотный горизонт минеральной почвы; АТп – пахотный горизонт органогенной почвы; А<sub>2</sub> – подпахотный (элювиальный) горизонт почвы.

– нулевой: отсутствие признаков неблагоприятных экологических последствий и ограничений эффективного хозяйственного использования; характеризуется отсутствием ограничений на виды землепользования, рекомендуемые для данного типа земель, и отсутствием достоверного снижения урожайности и качества растениеводческой продукции по сравнению с эталонами почв данного класса;

– слабый: незначительное снижение продуктивности агроценозов, качества производимой продукции или повышение себестоимости производства основных сельскохозяйственных культур (на 10–25%) по сравнению с соответствующими недеградированными (эталонными) землями, имеющими аналогичное расположение в рельефе и инфраструктуре хозяйства. Использование земель в аграрном производстве без ограничений;

– средний: снижение продуктивности или качества основных сельскохозяйственных культур, выращиваемых в данных условиях (на 25–50%), повышение себестоимости их производства в 1.3–2 раза или снижение санитарно-экологического качества получаемой продукции в 2–3 раза. Использование земель для производства сельскохозяйственной продукции малоэффективно на фоне ухудшения условий обработки почвы и ускорения деградации;

– высокий: нецелесообразность использования земель в аграрном производстве вследствие

очень сильного снижения продуктивности основных сельскохозяйственных культур (на 50–75%), повышение себестоимости их производства в 2–3 раза или снижение санитарно-экологического качества получаемой продукции в 3–10 раз. При этом резко ограничивается набор возможных видов сельскохозяйственных культур;

– катастрофический: ограниченность использования территории для жизни человека (например, высокий уровень техногенного загрязнения) и размещения аграрного производства. Продуктивность традиционных сельскохозяйственных культур падает более чем в 4 раза или отмечается сильное превышение ПДК загрязнителями в получаемой продукции.

#### ТЕРРИТОРИАЛЬНЫЕ АСПЕКТЫ ПРОЯВЛЕНИЯ ДЕГРАДАЦИИ ЗЕМЕЛЬ БЕЛАРУСИ

Проявление эрозионных процессов в республике имеет региональные особенности. В северной и центральной почвенно-географических провинциях, в которых более выражен холмистый рельеф и преобладают почвы связного гранулометрического состава, наиболее активно протекают водно-эрозионные процессы. В южной (Полесской) провинции, где выполнен большой объем осушительной мелиорации и преобладают почвы легкого гранулометрического состава, а

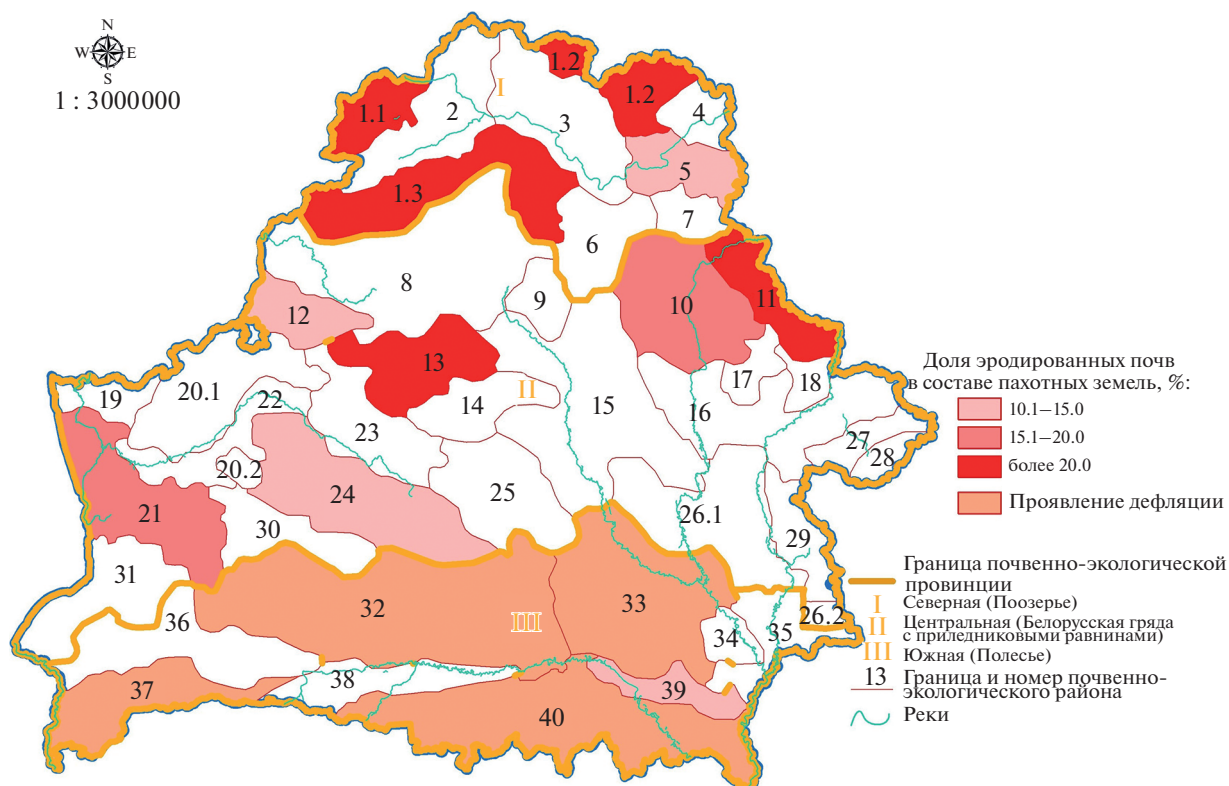


Рис. 1. Проявление водной эрозии и дефляции почв сельскохозяйственных земель в почвенно-экологических районах Беларуси.

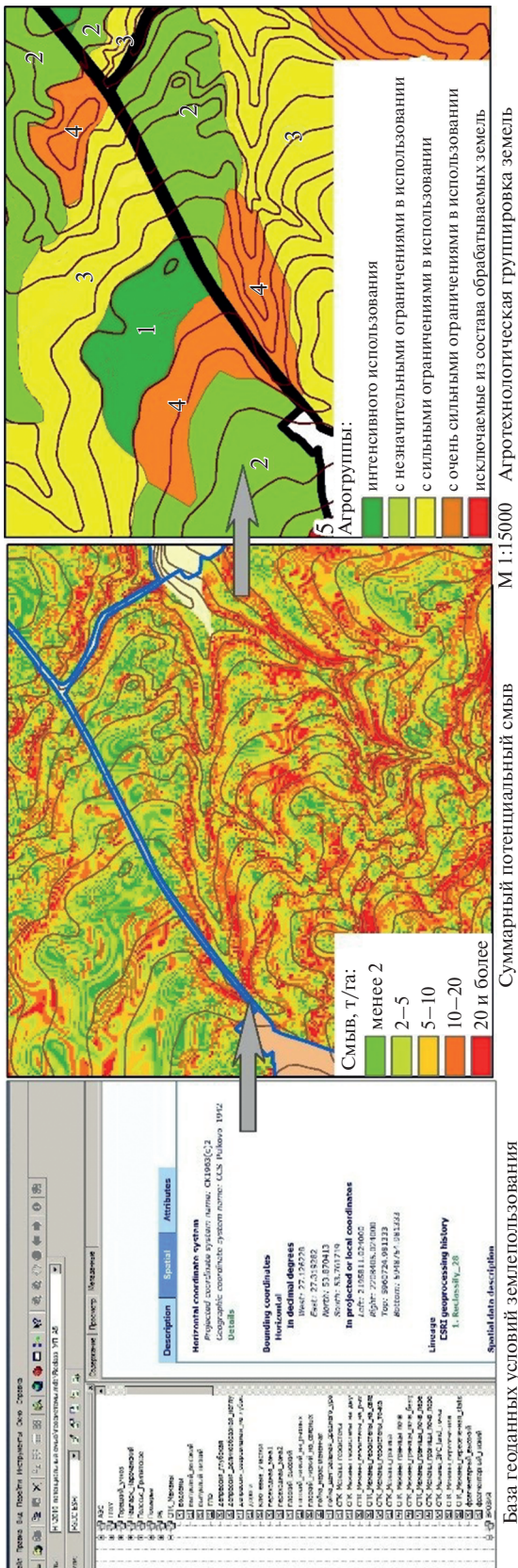
также осушенные торфяные почвы, заметное развитие получили процессы ветровой эрозии.

Степень проявления водно-эрозионных процессов в республике обусловлена пространственным сочетанием геоморфологических и почвенных особенностей территории, а также характером сельскохозяйственного использования земель. Водной эрозии почв подвержено 7.2% общей площади земель сельскохозяйственного назначения, что составляет более 550 тыс. га. По данным второго тура почвенного обследования в республике зафиксировано 361.7 тыс. га эродированных почв пахотных земель, в том числе слабой (240.1 тыс. га), средней (105.3 тыс. га) и сильной (16.3 тыс. га) степени.

На рис. 1 отражено проявление водно-эрозионных процессов и дефляции в разрезе почвенно-экологического районирования. Наиболее уязвимым к водной эрозии является регион распространения лёссов, лёссовидных пород – Горецкий, Мстиславский районы Могилевской области и часть Кореличского района Гродненской области. Дефляционно-опасные земли составляют 41.2% всех пахотных земель, или 2108.2 тыс. га, это легкие в гранулометрическом отношении почвы, а также органогенные осушенные торфяные. Наибольшее распространение дефляция получила в южной почвенно-экологической про-

винции. По данным метеорологических станций за период 40 лет в Белорусском Полесье зарегистрировано более 300 случаев проявления экстремальной дефляции, и их число растет на фоне глобального изменения климата. Здесь распространены пыльные бури средней и высокой интенсивности. Большинство пыльных бурь отмечается в теплый период года: весной – 52.2% от общего количества, летом – 37.8%, осенью – 9.4%.

По административным районам наблюдаются значительные колебания по доле эродированных почв в составе пахотных земель. Минимальную долю (менее 1%) имеют 25 районов, в основном сосредоточенные в Гомельской и Брестской областях. В 42 районах на долю эродированных почв приходится от 1 до 5% пахотных земель, в 28 районах – от 5 до 10%, здесь требуется применение адаптивных технологий возделывания сельскохозяйственных культур на основе территориального планирования (Червань, 2020). Наибольшие площади почв, подверженных процессам эрозионной деградации, в составе пахотных земель (>20%) отмечены в Новогрудском (21.7%), Кореличском (25.2), Горецком (26.1) и Мстиславском (46.6%) районах. Значительные площади эродированных почв имеются также в районах распространения холмисто-моренного ландшафта: Браславском – 16.6%; Городокском – 15.0; Ле-



**Рис. 2.** Агроэкологическая группировка земель по результатам оценки потенциального смыва почв в ГИС. Составлено по: (Червань, 2020).

пельском – 19.3%. Доля дефлированных почв в составе сельскохозяйственных земель значительно меньше, чем почв, подверженных водной эрозии – от 0.2% в Могилевской области до 1.9% в Гомельской. В целом по республике площадь почв, подверженных процессам дефляции, составляет 1.1% от общей площади сельскохозяйственных земель (Почвы ..., 2019).

Развитие эрозионной деградации сельскохозяйственных земель служит заметным снижающим фактором продуктивности возделываемых культур. Об этом свидетельствует применение в кадастровой оценке таких земель поправочных коэффициентов к исходному баллу пахотных земель (Кадастровая ..., 2017). Так, поправочные коэффициенты, установленные по результатам продуктивности в производственных посевах, для слабоэродированных почв составляют 0.884; среднеэродированных – 0.736; сильноэродированных – 0.609. Проведенная эколого-экономическая оценка размеров ущерба, нанесенного водной эрозией почв, за счет недобора урожая сельскохозяйственных культур и потерь питательных веществ в почвах ежегодно составляет около 25.0 млн долл. США (Яцухно, 2020). На дефлированных почвах общая сумма неполученного чистого дохода составляет свыше 1.5 млн долл. США.

С целью улучшения соблюдения землепользователями нормативов возможно использование методов экономического стимулирования. В первом приближении основой методики стимулирования может служить изученное влияние элементов почвозащитного земледелия на показатели эрозионной устойчивости почв и установленные нормативы их почвозащитной способности (табл. 4).

Проектирование севооборотов осуществляется с учетом нормативов допустимого смыва почв, а следовательно, затрат на его предотвращение, которые возрастают по мере усложнения агроландшафта – неоднородности структуры почвенного покрова. При активном развитии геоинформационных технологий и методов пространственного анализа данных картометрический учет неоднородности структуры почвенного покрова как наиболее коррелирующего фактора нормирования антропогенной нагрузки на почвы в агроландшафтах позволяет сформировать топологические модели их устойчивости в условиях техногенного воздействия. Агроэкологическая группировка земель и оценка потенциального смыва почв под действием водно-эрозионных процессов осуществляется с использованием геоинформационных средств (рис. 2).

Особую тревогу за экономическое состояние и нанесенный экономический ущерб вызывают использованные в сельскохозяйственных целях осушенные торфяные почвы. Общая площадь сельскохозяйственных земель Беларуси, подвер-

**Таблица 4.** Нормативы почвозащитной способности ( $H_{зс}$ ) и показатель эрозионной опасности дифференцированных севооборотов ( $H$ ) для почв, подверженных водной эрозии и дефляции

Соотношение культур, %					$H_{зс}$	$H$
пропашные	яровые зерновые и зернобобовые	озимые зерновые	однолетние травы	многолетние травы	водная эрозия/дефляция	
Зернопропашные севообороты						
42.8	28.6	28.6	0	0	0.52	0.48
28.6	42.8	28.6	0	0	0.58	0.42
Зернотравяно-пропашные севообороты						
33.4	33.4	16.6	16.6	0	0.54	0.46
22.2	33.5	11.1	0	22.2	0.58	0.42
33.4	33.4	16.6	0	16.6	0.59	0.41
25.0	25.0	25.0	25.0	0	0.60/0.60	0.40/0.40
20.0	40.0	20	20	0	0.61/0.61	0.39/0.39
25.0	25.0	25	12.5	12.5	0.63/0.63	0.37/0.37
28.7	14.2	28.7	14.2	14.2	0.63	0.37
14.2	28.7	28.7	14.2	14.2	0.70/0.70	0.30/0.30
25.0	25.0	25	0	25	0.71	0.29
14.2	28.7	14.2	14.2	28.7	0.72/0.70	0.28/0.30
12.5	37.5	12.5	0	37.5	0.74/0.74	0.26/0.26
12.5	25.0	37.5	0	25.0	0.77	0.23
12.5	12.5	12.5	0	62.5	0.81	0.19
6.2	12.5	25	6.3	50	0.82/0.82	0.18/0.18
Зернотравяные севообороты						
0	25.0	25.0	37.5	12.5	0.75/0.75	0.25/0.25
0	28.6	28.6	14.2	28.6	0.82	0.18
0	28.6	42.8	0	28.6	0.85	0.15
0	30.0	30.0	0	40.0	0.86	0.14
0	20.0	40.0	0	40.0	0.88/0.88	0.12/0.12
0	25.0	25.0	0	50.0	0.88	0.12
Травяно-зерновые севообороты						
0	25.0	12.5	25	37.5	0.80/0.74	0.20/0.26
0	12.5	25	12.5	50	0.86/0.85	0.14/0.15
0	14.3	28.6	14.3	42.8	0.86	0.14
0	14.2	14.2	14.2	57.4	0.88	0.12
0	12.5	12.5	12.5	62.5	0.88/0.88	0.12/0.12
0	12.5	25	0	62.5	0.91/0.88	0.09/0.12
0	0	14.2	14.2	71.6	0.92	0.08
0	12.5	12.5	0	75.0	0.92/0.92	0.08/0.08
0	0	30.0	0	70.0	0.94/0.94	0.06/0.06
0	0	33.0	0	67.0	0.95	0.05
0	0	25.0	0	75.0	0.96/0.96	0.04/0.04
0	0	20.0	0	80.0	0.96	0.04

Составлено по: (Черныш, 2016).

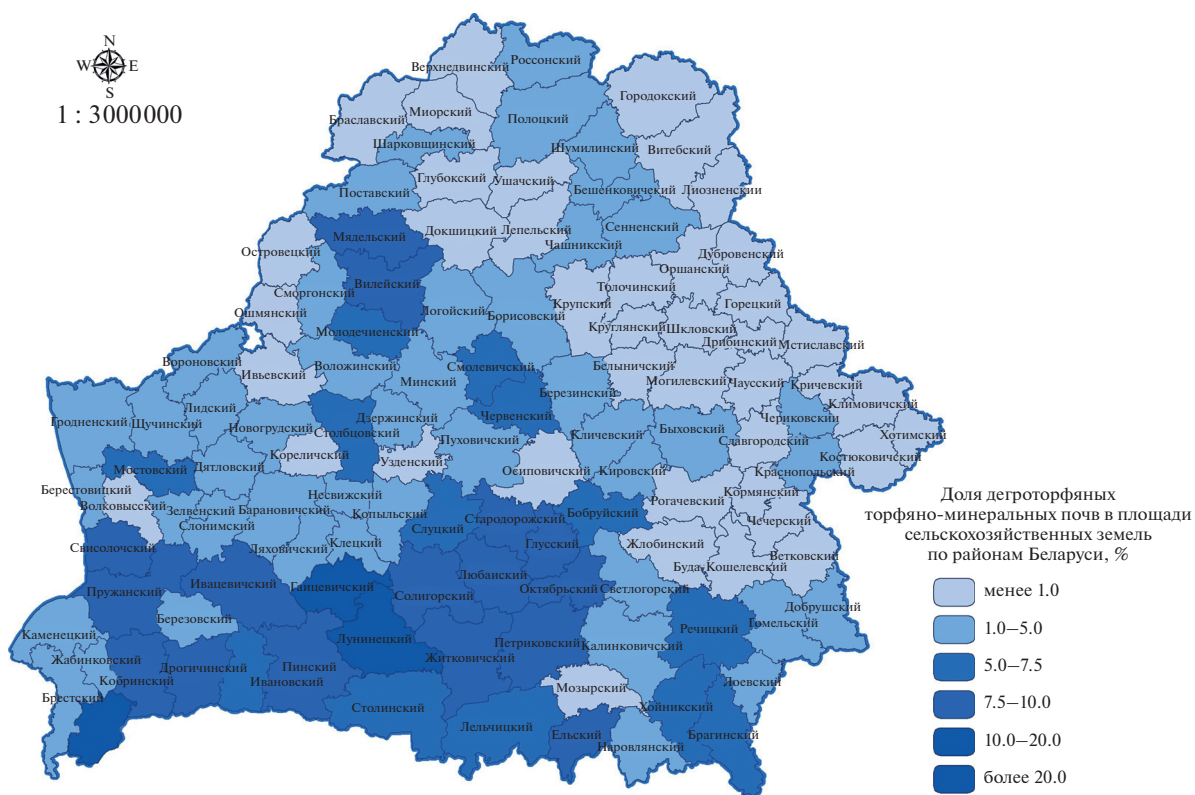


Рис. 3. Распространение деградированных торфяно-минеральных почв в составе сельскохозяйственных земель по административным районам Беларуси, %.

женных гидротехнической мелиорации, составляет около 2.9 млн га, из них органогенные почвы занимают свыше 1.1 млн га. Главным образом они сконцентрированы в южном регионе – Белорусском Полесье. В результате длительного и довольно интенсивного их использования эти почвы подвергались ускоренной минерализации органического вещества (ОВ). Это дало основание выделить отдельный тип деградированных почв с содержанием органического вещества менее 50% (Осушенные ..., 2018). Последние подразделяются на торфяно-минеральные почвы (ОВ – 50–20%), минеральные остаточные торфяные (ОВ – 20.1–5.0%), минеральные постторфяные (ОВ – менее 5.0%). Общая площадь таких почв в республике составляет 312.9 тыс. га (рис. 3). Снижение продуктивности возделывания сельскохозяйственных культур на них обусловлено наряду с потерей органического вещества нарушением водного режима, а также ростом внутривидовой пестроты почвенного покрова, в том числе за счет обнажения на поверхности рыхлопесчаных отложений.

В Республике Беларусь к числу существенных факторов деградации земель, особенно используемых в сельскохозяйственных целях, относится их радиационное загрязнение в результате аварии на Чернобыльской АЭС. Первоначально было за-

грязнено  $^{137}\text{Cs}$  с плотностью выше 37 кБк/м<sup>2</sup> (>1.0 Ки/км<sup>2</sup>) более 1.86 млн га сельскохозяйственных земель в 56 административных районах республики (Научные ..., 2011). Основная масса  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$ , определяющих уровень радиоактивного загрязнения, выпала на почвенный покров в прочносвязанной форме в составе твердых топливных частиц; значительная часть являлась компонентом аэрозолей (конденсационных выпадений), характерных для районов, удаленных от АЭС. Поверхностный контакт и перемешивание радиоактивных частиц с почвой привели к их трансформации – выщелачиванию из связанного состояния, сорбции почвенным поглощающим комплексом, окислами металлов и минералами. За 35-летний период загрязнения сельскохозяйственные земли претерпели существенные изменения, в первую очередь за счет полураспада вышеуказанных радионуклидов, их горизонтального территориального и вертикального по почвенному профилю перераспределения. О масштабах таких изменений свидетельствуют данные трансформации плотности загрязнения  $^{137}\text{Cs}$ , доля которого в общем радиоактивном загрязнении составляет 90% (Рекомендации ..., 2021).

Так, по состоянию на 01.01.2021 в сельскохозяйственном пользовании находится 848.0 тыс. га зе-



**Таблица 5.** Экспликация сельскохозяйственных земель Республики Беларусь по плотности загрязнения  $^{137}\text{Cs}$  (по состоянию на 01.01.2021)

Область	Площадь земель, тыс. га	Загрязнено $^{137}\text{Cs}$ >1.0 Ки/км <sup>2</sup>		В процентах по плотностям загрязнения, Ки/км <sup>2</sup>		
		тыс. га	%	1.0–4.9	5.0–15.0	15.0–40.0
Брестская	1189.9	36.409	3.06	97.59	2.40	0.01
Витебская	1241.8	0.068	0.01	100.00	0.00	0.00
Гомельская	1200.9	510.607	42.52	76.99	20.44	2.57
Гродненская	1075.1	15.064	1.40	98.04	1.96	0.00
Минская	1593.5	40.135	2.52	99.53	0.47	0.00
Могилевская	1076.0	245.765	22.84	81.57	17.07	1.35
<b>Всего по Беларуси</b>	<b>7377.2</b>	<b>848.048</b>	<b>11.50</b>	<b>80.64</b>	<b>17.41</b>	<b>1.95</b>

мель, загрязненных  $^{137}\text{Cs}$  с плотностью 37 кБк/м<sup>2</sup> и выше, что составляет 11.5% от общей площади землепользования (табл. 5). Из общей площади загрязненных земель 566.1 тыс. га (66.8%) занимают пахотные земли и 281.9 тыс. га (33.2%) – луговые земли.

За послеаварийный период формы  $^{137}\text{Cs}$  подверглись существенной трансформации. Произошло снижение доли водорастворимых и обменных форм, доступных для растений, и увеличение фиксированных малодоступных форм. Доля прочно фиксированного  $^{137}\text{Cs}$  в почвах колеблется от 75 до 95% (Рекомендации ..., 2021). Общая площадь сельскохозяйственных земель с высокой плотностью загрязнения  $^{137}\text{Cs}$  от 555 до 1480 кБк/м<sup>2</sup> (35–40 Ки/км<sup>2</sup>) составляет 16.5 тыс. га. В настоящее время в республике для загрязненных радионуклидами земель разработаны научно обоснованная нормативная база и технологии возделывания сельскохозяйственных культур, позволяющие обеспечить, с одной стороны, производство продукции, соответствующей санитарно-гигиеническим нормативам, с другой стороны – предотвращение процессов деградации земель путем их реабилитации (Научные ..., 2011).

#### ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ И МЕРОПРИЯТИЯ ПО БОРЬБЕ С ДЕГРАДАЦИЕЙ ЗЕМЕЛЬ БЕЛАРУСИ

Следует отметить, что разработка и осуществление мероприятий по борьбе с деградацией земель относятся к числу приоритетных и практически востребованных направлений государственной земельной политики и регулирования землепользования. Подтверждение этому отражено в статье 1 Кодекса о земле Республики Беларусь, где понятие “охрана земель” – система мероприятий, направленных на предотвращение деградации земель, восстановление деградированных земель. Кроме того, на каждые пять лет на

государственном уровне принимается Национальный план действий по предотвращению деградации земель/почв<sup>5</sup>, реализация которого строго контролируется Межведомственным координационным советом при Министерстве природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь.

В рамках недавно разработанного прогноза окружающей среды до 2035 г. поставлена амбициозная, но вполне выполнимая задача достижения нейтрального баланса деградации земель, подверженных водной и ветровой эрозии, а также деградируемых земель с осушенными торфяными почвами и нарушенных земель в результате добычи полезных ископаемых и различных видов строительной деятельности.

Земли сельскохозяйственного назначения территорий распространения холмисто-моренных ландшафтов краевой ледниковой аккумуляции, а также лёссовидных и лёссовых пород в связи с высокой неоднородностью структуры почвенного покрова и агрофизическими свойствами почв являются первоочередными объектами осуществления мероприятий по борьбе с деградацией земель (включая почвы).

Указанная задача будет осуществляться согласно специальному Техническому руководству, разработанному Секретариатом и Глобальным механизмом Конвенции ООН по борьбе с опустыниванием (Нейтральный ..., 2016). Учитывая масштабы и размеры ущерба вследствие деградации почв на сельскохозяйственных землях, Министерством сельского хозяйства и продовольствия принята Программа мероприятий по повышению плодородия и защиты от деградации почв на 2021–2025 гг., включающая комплекс организационно-территориальных и агротехнических

<sup>5</sup> О Национальном плане действий по предотвращению деградации земель (почв) на 2021–2025 гг., утв. Пост. Совета Министров Республики Беларусь от 15.06.2021, № 341.

мероприятий (Комплекс ..., 2020). Успешное практическое решение этих задач потребует взаимоувязанного осуществления деятельности в ближайшем будущем по следующим направлениям:

- совершенствование экономического механизма регулирования землепользования (обеспечение принципа платности землепользования, повышение регулирующей роли земельного налога и арендной платы, развитие системы компенсационных выплат и др.);
- повышение роли и ответственности местных органов власти и управления, конкретных землепользователей за проведение мероприятий по охране и улучшению земель и выполнение экологических требований;
- разработка региональных схем использования и охраны земель, в том числе для проблемных регионов, схем землеустройства районов, проектов внутрихозяйственного землеустройства, охраны и улучшения земель, а также проектов лесоустройства, гидротехнической мелиорации и градостроительных проектов;
- формирование полного перечня возможных требований и ограничений на хозяйственное использование земель и доведение их до землепользователей путем регистрации в государственном земельном кадастре и отражения в документах, удостоверяющих права на землю;
- интеграция принципов и методов сохранения биологического и ландшафтного разнообразия, восстановления экосистем в практику территориального планирования;
- продолжение работ по оптимизации землепользования на основе обновленной земельно-кадастровой информации с целью репрофилирования или исключения из сельскохозяйственного оборота малопродуктивных земель;
- разработка (совершенствование) методов и технологий проектирования и осуществления мероприятий по инвентаризации, мониторингу, охране и улучшению земель/почв с использованием дистанционных методов и геоинформационных технологий;
- достижение оптимальной структуры сельскохозяйственных земель и посевных площадей; восстановление и поддержание ресурсосберегающих почвозащитных севооборотов, а также разработка и внедрение систем органического земледелия (до 2025 г.) на 2,0% площади сельскохозяйственных земель страны;
- доведение площади реабилитации нарушенных торфяных месторождений к 2025 г. до 70,0 тыс. га;
- гармонизация национального законодательства и институциональной инфраструктуры в области устойчивого использования и охраны зе-

мельных ресурсов со странами Европейского союза и СНГ.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Деградация и охрана почв / под ред. Г.В. Добровольского. М.: МГУ, 2002. 654 с.
- Евдокимова Н.В.* Отечественный и зарубежный опыт экологического нормирования состояния почв и воздействия на них // Экологическое нормирование и управление качеством почв и земель / под общ. ред. С.А. Шобы, А.С. Яковлева, Н.Т. Рыбальского. М.: НИИ-Природа, 2013. С. 230–240.
- Кадастровая оценка сельскохозяйственных земель сельскохозяйственных организаций и крестьянских (фермерских) хозяйств: методика, технология, практика / под ред. Г.М. Мороза, В.В. Лапы. Минск: ИВЦ Минфина, 2017. 208 с.
- Комплекс мероприятий по повышению плодородия и защите от деградации почв сельскохозяйственных земель Республики Беларусь на 2021–2025 гг., утв. Минсельхозпродом Республики Беларусь от 22.12.2020, № 7. 148 с.
- Методические указания по проектированию почвозащитной системы земледелия с контурно-мелиоративной организацией территории в разных ландшафтных зонах Республики Беларусь / под ред. А.Ф. Черныша. Минск, 1998. 43 с.
- Научные основы реабилитации сельскохозяйственных территорий, загрязненных в результате крупных радиационных аварий / под общ. ред. Н.Н. Цыбулько. Минск: Ин-т радиологии, 2011. 438 с.
- Нейтральный баланс деградации земельных ресурсов. Программа постановки целей. Техническое руководство. КБО ООН, Бонн (Германия), 2016. 77 с.
- Осушенные торфяные и дегроторфяные почвы в составе сельскохозяйственных земель Республики Беларусь: практическое пособие / под общ. ред. В.В. Лапы. Минск: ИВЦ Минфина, 2018. 215 с.
- Помелов А.С.* Актуальные вопросы структурирования процессов деградации земель // Земля Беларуси. 2006. № 2. С. 10–15.
- Почвы Республики Беларусь / под ред. В.В. Лапы. Минск: ИВЦ Минфина, 2019. 632 с.
- Природа Беларуси на рубеже тысячелетий / ред. А.А. Коваленя и др. Минск.: Беларуская навука, 2020. 367 с.
- Рекомендации по эффективному использованию загрязненных радионуклидами эрозийноопасных земель. Минск: Ин-т почвоведения и агрохимии, 2021. 32 с.
- Стратегия реализации Конвенции ООН по борьбе с опустыниванием. Национальный план действий по предотвращению деградации земель (включая почвы) на 2016–2020 гг., утв. Пост. Совета Министров Республики Беларусь от 29.04.2015, № 361. Минск, 2015. 56 с.
- Стратегия в области охраны окружающей среды Республики Беларусь на период до 2025 года, одобренная решением коллегии Министерства природных

- ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь от 28.01.2011, № 8-Р. Минск, 2011. 19 с.
- Червань А.Н., Черныш А.Ф. Эрозионные агроландшафты Беларуси: борьба с эрозией почв и территориальное планирование землепользования // Эрозионные и русловые процессы. Сб. науч. тр. М.: МГУ, 2020. Вып. 7. С. 338–356.
- Червань О., Черныш А., Устинова Г. Геоінформаційне моделювання у ґрунтозахисній організації агроландшафтів Білорусі // Вісн. Львівського університету. Сер. геогр. 2013. Вип. 44. С. 388–396.
- Черныш А.Ф., Устинова А.М., Червань А.Н., Цыришко В.Б., Касьяненко И.И. Деградация почв сельскохозяйственных земель Беларуси: виды и количественная оценка // Почвоведение и агрохимия. 2016. № 2 (57). С. 7–18.
- Яцухно В.М., Тишкович О.В. Эколого-экономическая оценка ущерба от водной эрозии почв сельскохозяйственных земель административных районов Беларуси // Вестн. БГСХА. 2020. № 3. С. 212–216.
- Яцухно В.М., Черныш А.Ф. Проблема деградации земель Беларуси: обзорная информация. Минск: БелНИЦ “ЭКОЛОГИЯ”, 2003. 33 с.
- Andreeva O.V., Lobkovsky V.A., Kust G.S., Zonn I.S. The Concept of Sustainable Land Management: Modern State, Models and Typology Development // Arid Ecosyst. 2021. V. 11. № 1. P. 1–10. <https://doi.org/10.1134/S2079096121010029>
- Soil threats in Europe: Status, methods, drivers and effects on ecosystem services. JRC Technical Reports, European Commission. Luxemburg, 2016. 207 p.

## Methodological Approaches and Practical Application of the Results of Land/Soil Degradation Assessment in Belarus

A. M. Chervan<sup>1, 2, \*</sup>, M. M. Tsybulka<sup>1</sup>, and V.M. Yatsuhno<sup>2, \*\*</sup>

<sup>1</sup>Institute for Soil Science and Agrochemistry National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

<sup>2</sup>Belarusian State University, Minsk, Belarus

\*e-mail: ChervanAlex@mail.ru

\*\*e-mail: yatsukhno@bsu.by

The article reflects the long-term experience of scientific research in determining the role and influence of biophysical, socioeconomic, and territorial-organizational factors on the manifestation of land degradation processes (including soils) and their ecological and economic consequences in the Republic of Belarus. A scientifically grounded system of national criteria and indicators of land degradation, harmonized with the strategic goals of the implementation of the UN Convention to Combat Desertification (UNCCD), has been proposed. The developed scientific and methodological base is described in detail, used in identifying, mapping, assessing the state and monitoring of lands (soils) exposed to water and wind erosion, accelerated transformation of organogenic (peat) soils, radiation-contaminated agricultural lands, lands disturbed by the extraction of peat and sand-gravel mixtures, expansion of transport infrastructure. Examples of practical constructive use of the results of land degradation assessment in the preparation of the Strategy and the National Action Plan aimed at its prevention, achievement of a neutral (zero) balance of land degradation and their restoration, substantiation and implementation of innovative agricultural technologies, improvement of territorial planning measures, mitigation of the effects of climate change are given. A system of measures is proposed to improve the regulatory, institutional, and scientific-methodological support for the successful solution of the problem related to the prevention and control of land/soil degradation in the republic.

**Keywords:** land/soil degradation, land use, types of land/soil degradation, criteria and indicators, scientific and methodological support

### REFERENCES

- Andreeva O.V., Lobkovsky V.A., Kust G.S., Zonn I.S. The concept of sustainable land management: modern state, models and typology development. *Arid Ecosyst.*, 2021, vol. 11, no. 1, pp. 1–10. <https://doi.org/10.1134/S2079096121010029>
- Chervan' A.M., Chernysh A.F. Erosional agricultural landscapes of Belarus: Combating soil erosion and spatial land use planning. *Eroziionnye i Ruslovye Protsessy*, 2020, no. 7, pp. 338–356. (In Russ.).
- Chervan' A., Chernysh A., Ustinova A. Geoinformation modeling in the soil protection organization of agro-landscapes of Belarus. *Visn. L'vov's'kogo Univ., Ser. Geogr.*, 2013, vol. 44, pp. 388–396. (In Ukr.).
- Chernysh A.F., Ustinava A.M., Chervan' A.M., Tsyrybka V.B., Kas'yanenka I.I. Soil degradation of agricultural lands in Belarus: types and quantitative assessment. *Pochvovedenie i Agrokhimiya*, 2016, vol. 57, no. 2, pp. 7–18. (In Russ.).
- Degradatsiya i okhrana pochv* [Soil Degradation and Protection]. Dobrovol'skii G.V., Ed. Moscow: Mosk. Gos. Univ., 2002. 654 p.
- Evdokimova N.V. Domestic and foreign experience in environmental regulation of the state of soils and the impact on them. In *Ekologicheskoe normirovanie i upravlenie kachestvom pochv i zemel'* [Environmental Regulation and Management of Soil and Land Quality]. Shoba S.A., Ya-

- kovlev A.S., Rybal'skii N.T., Eds. Moscow: NIA-Priroda Publ., 2013, pp. 230–240. (In Russ.).
- Kadastrrovaya otsenka sel'skokhozyaistvennykh zemel' sel'skokhozyaistvennykh organizatsii i krest'yanskikh (fermerskikh) khozyaistv: metodika, tekhnologiya, praktika* [Cadastral Valuation of Agricultural Land of Agricultural Organizations and Peasant (Farmer) Households: Methodology, Technology, Practice]. Moroz G.M., Lapa V.V., Eds. Minsk: IVTs Minfina, 2017. 208 p.
- Complex of Measures to Increase Fertility and to Prevent Soil Degradation of Agricultural Lands in the Republic of Belarus for 2021–2025. Approved by Ministry of Agriculture and Food of the Republic of Belarus from 22.12.2020, no. 7. 148 p. (In Russ.).
- Metodicheskie ukazaniya po proektirovaniyu pochvozashchitnoi sistemy zemledeliya s konturno-meliorativnoi organizatsiei territorii v raznykh landshchafnykh zonakh Respubliki Belarus'* [Methodological Guidelines for Design of a Soil-Protective System of Agriculture with a Contour-Reclamation Organization of the Territory in Different Landscape Zones of the Republic of Belarus]. Chernysh A.F., Ed. Minsk, 1998. 43 p.
- Nauchnye osnovy reabilitatsii sel'skokhozyaystvennykh territorii, zagryaznennykh v rezultate krupnykh radiatsionnykh avarii* [Scientific Basis for the Rehabilitation of Agricultural Areas Contaminated as a Result of Major Radiation Accidents]. Tsybul'ko M.M., Ed. Minsk: Inst. Radiol., 2011. 438 p.
- Neytral'nyi balans degradatsii zemel'nykh resursov. Programma postanovki tselei. Tekhnicheskoe rukovodstvo* [Neutral balance of land degradation. Goal setting program. Technical guide]. UNCCD, Bonn (Germany), 2016. 77 p.
- Osushennyye torfyanye i degrotorfyanye pochvy v sostave sel'skokhozyaystvennykh zemel' Respubliki Belarus'* [Drained Peat and Degraded Peat Soils in the Agricultural Lands of the Republic of Belarus: a Practical Guide]. Lapa V.V., Ed. Minsk: IVTs Minfina, 2018. 215 p.
- Pomelov A.S. Topical issues of structuring land degradation processes. *Zemlya Belarusi*, 2006, no. 2, pp. 10–15. (In Russ.).
- Pochvy Respubliki Belarus'* [Soils of the Republic of Belarus]. Lapa V.V., Ed. Minsk: IVTs Minfina, 2019. 632 p.
- Priroda Belarusi na rubezhe tysyacheletii* [The Nature of Belarus at the Turn of the Millennium]. Kovalenya A.A., Ed. Minsk: Belaruskaya Navuka Publ., 2020. 367 p.
- Rekomendatsii po effektivnomu ispol'zovaniyu zagryaznennykh radionuklidami erozionnoopasnykh zemel'* [Recommendations for the Effective Use of Erosion-Hazardous Lands Contaminated with Radionuclides]. Minsk: Inst. Pochvovedeniya i Agrokhemii, 2021. 32 p.
- Soil Threats in Europe: Status, Methods, Drivers and Effects on Ecosystem Services*. JRC Technical Reports, European Commission. Luxemburg, 2016. 207 p.
- Strategy for the Implementation of the UN Convention to Combat Desertification. National Action Plan to Prevent Land Degradation (Including Soils) for 2016–2020, Approved by the Decree of the Council of the Ministers of the Republic of Belarus from 29.04.2015, no. 361. Minsk, 2015. 56 p. (In Russ.).
- Strategy for Environmental Protection in the Republic of Belarus for the Period up to 2025, Approved by the Decision of the Collegium of the Ministry of Natural Resources and Environmental Protection of the Republic of Belarus of 28.01.2011, no. 8-P. Minsk, 2011. 19 p. (In Russ.).
- Yatsukhno V.M., Tishkovich O.V. Ecological and economic assessment of damage from water erosion of soils of agricultural lands of the administrative regions of Belarus. *Vestn. BGSKHA*, 2020, no. 3, pp. 212–216. (In Russ.).
- Yatsukhno V.M., Chernysh A.F. *Problema degradatsii zemel' Belarusi: obzornaya informatsiya* [Land Degradation Problem in Belarus: Overview]. Minsk: BelNITS "EKOLOGIYA", 2003. 33 p.

## ПРОБЛЕМЫ ДЕГРАДАЦИИ ЗЕМЕЛЬ И УСТОЙЧИВОГО ЗЕМЛЕПОЛЬЗОВАНИЯ

УДК 911.3

### ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ДИФФЕРЕНЦИАЦИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА В РОССИИ В УСЛОВИЯХ ПРИРОДНОГО И СОЦИАЛЬНОГО ОПУСТЫНИВАНИЯ

© 2022 г. Т. Г. Нефедова\*

*Институт географии РАН, Москва, Россия*

*\*e-mail: trene12@igras.ru*

Поступила в редакцию 25.06.2021 г.

После доработки 17.08.2021 г.

Принята к публикации 12.10.2021 г.

В статье рассмотрено изменение трех основных факторов пространственной трансформации сельского хозяйства: природных, институционально-экономических и социальных. Показано, как исторически менялись результаты сельского хозяйства в зависимости от колебаний природных условий, в том числе – периодических засух. По изменению увлажнения в XX и XXI вв. и индикатору объемов производства зерновых культур выявлены относительно благополучные и кризисные периоды. Приведены примеры катастрофического влияния засух и приспособления к ним в отдельных регионах. Показано, что любой кризис, в том числе и природный, высвечивает хронические социально-экономические проблемы организации хозяйства. Социально-экономическая дифференциация сельской местности, связанная с удаленностью от городов и транспортных магистралей, в значительной степени влияет на обеспеченность сельскохозяйственного производства трудовыми ресурсами. Последнее зависит от длительности и масштабов сельской депопуляции и современных миграционных процессов, приводящих в некоторых районах к социальному опустыниванию, также катастрофичному для сельского хозяйства. Особое внимание уделено постсоветским институциональным преобразованиям, которые, хотя и действовали по всей стране, имели различные последствия на территориях с разными природными условиями, в том числе в зонах переувлажнения и природного опустынивания. Важным фактором пространственной дифференциации результатов сельского хозяйства служит сочетание в разных регионах организационных форм хозяйствования: от агрохолдингов до личных подсобных хозяйств населения. Главными результатами стали изменение специализации сельскохозяйственного производства в ряде регионов, усиление его организационной и пространственной поляризации и концентрации (при общем увеличении объемов сельскохозяйственного производства в стране), сжатие сельскохозяйственного землепользования и сдвиг производства зерна в южные регионы. Это сделало сельское хозяйство постсоветской России более чувствительным к климатическим и погодным колебаниям, несмотря на модернизацию производства.

*Ключевые слова:* сельское хозяйство, производство зерна, засухи, природное опустынивание, сельское расселение, пространственная поляризация, социальное опустынивание

DOI: 10.31857/S2587556622010101

#### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ, МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Различное проявление многих глобальных вызовов, сформулированных в целях устойчивого развития ООН до 2030 г.<sup>1</sup>, характерно не только для разных стран, но и для разных регионов РФ. Особенно это касается возможностей эффективного использования земель при концентрации сельскохозяйственного производства, сопровож-

дающегося, как правило, деградацией части сельскохозяйственных угодий. Особые проблемы порождает природное и социальное опустынивание. И если первое связано с высокой уязвимостью состояния земель от изменения климата и флуктуаций погоды, в том числе в связи с потерями запасов влаги и аридизацией, то второе стимулируется продолжающейся урбанизацией и поляризацией социально-экономического пространства, в результате чего забрасываются и зарастают кустарником и лесом большие площади сельскохозяйственных земель. Проявления этих проблем пространственно разделены. Опустынивание из-за усиления за-

<sup>1</sup> Повестка дня в области устойчивого развития на период до 2030 г. Резолюция A/RES/71/1, принятая Генеральной Ассамблеей ООН 25 сентября 2015 г. [https://unctad.org/meetings/tn/SessionalDocument/ares70d1\\_ru.pdf](https://unctad.org/meetings/tn/SessionalDocument/ares70d1_ru.pdf).

сушливости климата наиболее актуально в южных регионах России, хотя в годы наиболее сильных засух может охватывать и территории с умеренным климатом. Социальное опустынивание, связанное с оттоком сельского населения в города и с забрасыванием освоенных сельскохозяйственных земель, в советское время было наиболее характерно для регионов умеренного пояса, особенно центральных районов России, к которым в постсоветское время добавились северные и восточные регионы. И хотя термин “опустынивание” не совсем созвучен восприятию проблем в русском языке (Глобальный ..., 2019, с. 64), в данном случае он применяется для обозначения разной степени опустошения территории, в том числе в связи с неблагоприятными социальными или природными процессами в сельской местности. При этом региональные различия в результатах сельского хозяйства в их динамике служат ярким индикатором этих процессов.

Возникновение и масштабы природного или социального опустынивания в сельской местности связаны с определенными рисками:

– природными, обусловленными разной степенью благоприятности природной среды для жизни населения, той или иной деятельности, а также возникающими в результате естественного или антропогенного изменения природных ландшафтов;

– историко-географическими, связанными со сложившимся характером освоения территории, редкой сетью больших городов, оказывающих влияние на сельскую местность, и значительными различиями между пригородами и периферией российских регионов;

– демографическими и социальными, обусловленными разной степенью депопуляции сельского населения в разных муниципальных районах, его уровнем доходов, а также степенью современной мобильности населения;

– экономическими и институциональными, связанными с изменением структуры экономики в сельской местности и институциональных условий для развития крупного, среднего и малого бизнеса, с централизацией бюджетной политики, лишавшей регионы, муниципальные районы и сельские поселения свободы распоряжения средствами.

Работа основывалась на данных федеральной службы государственной статистики с привлечением картографического метода исследований по регионам РФ. При этом применялся комплексный подход, позволивший рассматривать влияние климатических и погодных изменений на состояние сельского хозяйства совместно с влиянием социально-экономических и институциональных факторов посредством использования индикаторов, в частности показателей производства зерна

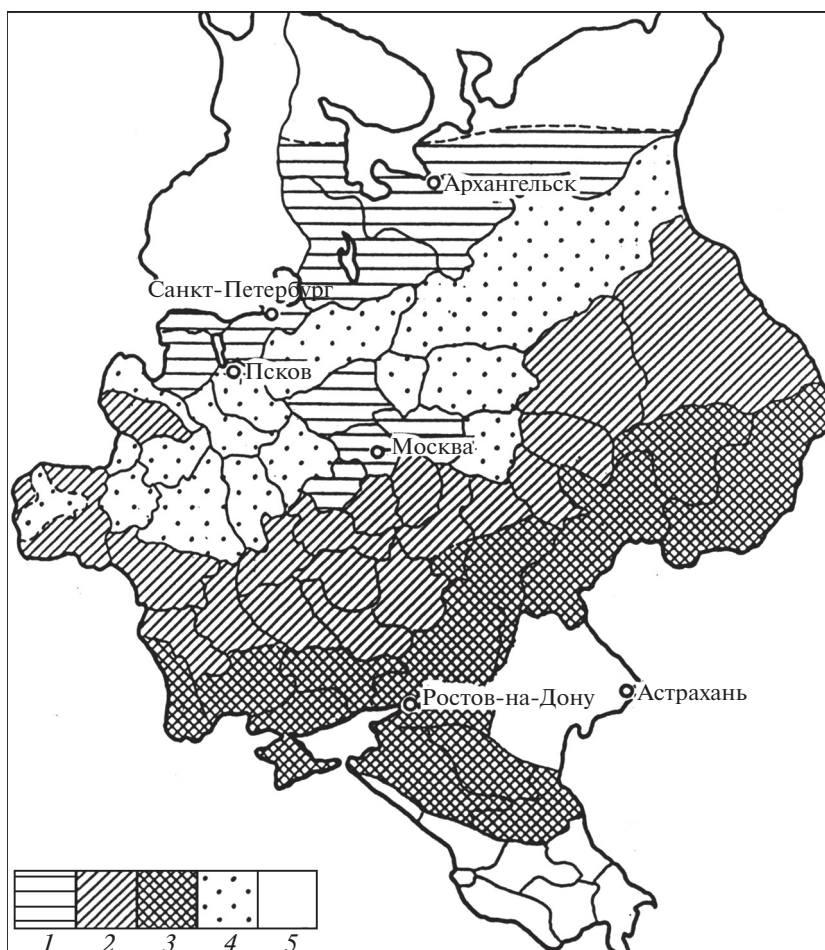
и его урожайности. Это не раскрывает всех возможностей развития сельского хозяйства, однако в определенной степени отражает состояние растениеводства, а через производство кормов – и животноводства. В России население и сельскохозяйственное производство исторически сдвинуты из зон, наиболее благоприятных для растениеводства, в районы с более суровыми условиями. Помимо большей или меньшей зависимости от природных условий, у разных районов есть свои социально-экономические стимулы и ограничения развития сельского хозяйства.

### ВЛИЯНИЕ ПРИРОДНЫХ И СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ОГРАНИЧЕНИЙ РАЗВИТИЯ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА В СОВЕТСКОЕ ВРЕМЯ

В начале XX в. Россия была одним из крупных мировых производителей льна и зерна. При этом в центральном нечерноземном поясе с развивающейся промышленностью мелкоконтурное зерновое хозяйство среди лесов существовало, в основном, для потребления домохозяйств, а в южной товарной зерновой зоне с благоприятными природными условиями зерно шло в города и на экспорт (рис. 1). Такое землепользование в Центре России было возможно при избыточном сельском населении, большой доле ручного труда и его дешевизне (Нефедова, 2013а).

Территории с наиболее благоприятными условиями для жизни населения и сельского хозяйства занимают в России всего 14% ее площади, в основном в южных лесостепных и степных районах (Атлас ..., 2020; Гордеев и др., 2006). Советская власть, озабоченная продовольственным обеспечением растущего городского населения, расширила посевные площади в нечерноземных районах европейской части страны, а также за Уралом в регионах с более сложными природными условиями, что требовало повышенных вложений и неэкономического принуждения. Это обуславливало низкую продуктивность земель и неустойчивость урожаев.

Ежегодные колебания увлажнения оказывали заметное влияние на растениеводство. Но особенно сложная ситуация складывалась, когда этот фактор совмещался с социально-экономическими преобразованиями. Так, в первой половине XX в. неурожай, вызванный политическими кризисами и институционально-экономическими преобразованиями, были усилены периодическими засухами. Например, голод 1921–1922 гг. был вызван на фоне засух, в большей степени, гражданской войной и разрухой. Голод начала 1930-х годов во многом был связан с коллективизацией и возник “в результате принудительных сталинских хлебозаготовок” (Кондрашин, 1991, 2008, с. 331), хотя и был значительно усилен недо-



**Рис. 1.** Районы избытка и недостатка хлеба в 1913 г.: 1 – сильный недостаток, 2 – избыток, 3 – сильный избыток, 4 – баланс, 5 – нет данных.

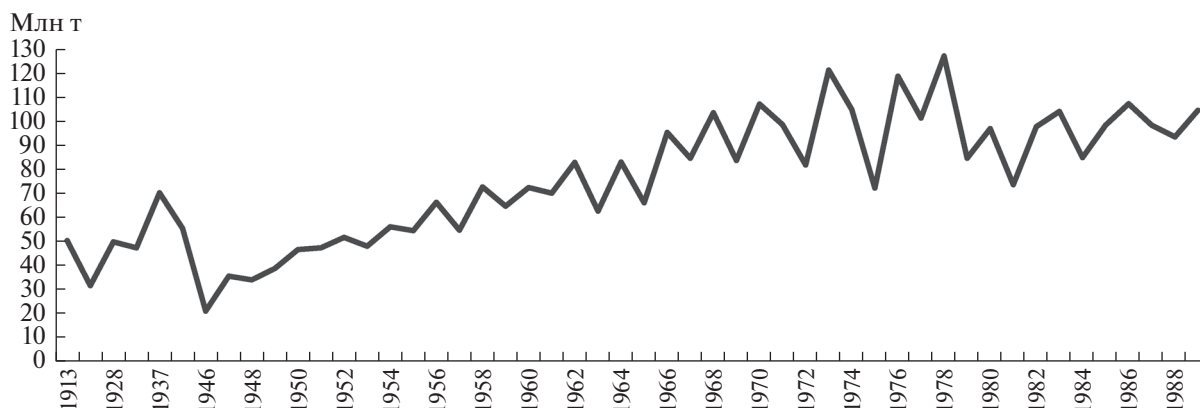
Источник: (Экономическая ..., 1929).

бором хлеба из-за засух. Аналогичные меры принимались на Украине и на Северном Кавказе, что также привело к голоду и массовой смертности.

В более спокойные послевоенные годы самой сильной была засуха 1946 г. (рис. 2), которая затронула почти весь Центрально-Черноземный район, 80% территории Среднего и Нижнего Поволжья и 40–50% территории Северного Кавказа и Урала (Дронин, 2014). Она в определенной мере стимулировала Совет министров СССР и ЦК ВКП(б) принять в 1948 г. постановление “О плане создания полезащитных лесных насаждений, внедрения травопольных севооборотов, строительства прудов и водоемов для обеспечения высоких и устойчивых урожаев в степных и лесостепных районах европейской части СССР”. Тем не менее, в 1953 г. вместо этого разумного шага по инициативе Н.С. Хрущёва был принят более радикальный вариант – освоение целинных и залежных земель<sup>2</sup>. Одним из его обоснований послужили наблюдения о частом несовпаде-

нии засух в европейской и азиатской частях страны, позволяющем балансировать получение суммарного урожая. По мнению ученых, освоение целины могло дать эффект при выборочной распашке черноземных почв под зерновые культуры и использовании каштановых почв для развития мясного пастбищного скотоводства (Чибилёв, 2004). Но в результате каштановые почвы сухих степей при широкомасштабной распашке теряли запас влаги, что и привело к антропогенной аридизации территории и без того с частыми метеорологическими засухами. Плодородие пахотных угодий целинных районов падало, а производство товарного зерна было нестабильным с возрастающей амплитудой перепадов (см. рис. 2). Кормового зерна также не хватало, страна все сильнее зависела от импорта.

<sup>2</sup> Постановление Пленума ЦК КПСС 1954 г. “О дальнейшем увеличении производства зерна в стране и об освоении целинных и залежных земель”.



**Рис. 2.** Производство зерна в России с 1913 по 1989 г., млн т (в весе после доработки). С 1946 г. показатели ежегодно. Составлено: по данным Госкомстата и Росстата за соответствующие годы.

Катастрофами второй половины века стали сильные засухи 1970-х годов. Засуха 1972 г. охватила почти всю европейскую часть страны, в том числе значительную часть нечерноземных регионов, где быстро распространились лесные и торфяные пожары. Население крупных городов задыхалось от дыма. Эта засуха нанесла серьезный урон всему сельскому хозяйству, не только производству зерна. Пожары вместе с лесами уничтожили сады, виноградники, овощи на полях, озимые и яровые культуры. Спасти страну от продовольственного кризиса удалось благодаря увеличению импорта и продаже 486 т золота из золотовалютных резервов<sup>3</sup>. Засуха 1975 г., охватившая южные хлебные регионы, в том числе в Сибири, лишила страну значительного урожая пшеницы. В результате увеличения закупок миллионов тонн зерна в США, Канаде и Аргентине (благодаря продаже нефти Западной Сибири) цены на зерно во всем мире подскочили вдвое. Это отразилось даже на странах третьего мира, расположенных в тысячах километров от зоны засухи.

В позднесоветские годы производство зерна в России также было весьма неустойчивым, ежегодные колебания достигали 30–50 млн т (см. рис. 2). Сильные засухи сопровождались лесными и полевыми пожарами. Правительство было озабочено недостатком кормов и масштабным импортом зерна. Неустойчивость сельского хозяйства на юге страны сопровождалась усилением социально-экономического кризиса в более северных регионах. В 1980-х годах убыточны были 3/4 колхозов и более 2/3 совхозов<sup>4</sup>, большей частью – в Нечерноземной зоне и на востоке

страны. После того, как в них стали закачивать большие средства в виде дотаций и кредитов, а долги регулярно списывать, рентабельность коллективных предприятий “выросла”. Однако расчеты экономистов показывали, что и к 1990-м годам Россия подошла с 2/3 убыточных агропредприятий, хотя формально они получали прибыль (Александров, 1993). В стране разгорался продовольственный кризис.

Важным фактором развития сельского хозяйства в лесных и лесостепных регионах стало сильное истощение трудовых ресурсов в сельской местности. Развитие России слишком долго было экстенсивным, т.е. основывалось на вовлечении все большего количества ресурсов и опиралось до середины XX в. на излишки сельского населения в староосвоенных регионах. Еще в советское время в результате бурной индустриализации и урбанизации именно там наметился тренд сосредоточения населения в ограниченном числе крупных центров и их пригородах. При этом активно стимулировалось заселение восточных регионов, также за счет староосвоенных регионов европейской части страны. В результате регионы в Центре России только за 1959–1989 гг. потеряли половину и более сельского населения (рис. 3) в дополнение к потерям военных лет и последствиям массовых репрессий первой половины XX в. Наиболее сильная депопуляция характерна для периферии регионов (Июффе, Нефедова, 2001).

Проблемы сельского хозяйства Нечерноземья, в том числе низкие и неустойчивые урожаи зерна на фоне активизировавшейся депопуляции населения и разрушения сети поселений, стимулировали появление масштабного проекта интенсификации сельского хозяйства в староосвоенных районах. Это привело к притоку инвестиций в сельское хозяйство Нечерноземья, которое получало в 1960–80-х годах от 20 до 28% государственных капиталовложений вместо послевоенных 7%<sup>5</sup>.

<sup>3</sup> Самое страшное лето в СССР. Засуха 1972 года. [https://pikabu.ru/story/samoe\\_strashnoe\\_let\\_o\\_v\\_ussr\\_zasukha\\_1972\\_goda\\_6640318](https://pikabu.ru/story/samoe_strashnoe_let_o_v_ussr_zasukha_1972_goda_6640318).

<sup>4</sup> Народное хозяйство РСФСР. Стат. ежегодник / СУ при Совете Министров РСФСР. М.: Госкомстат России, 1991. С. 403, 407.



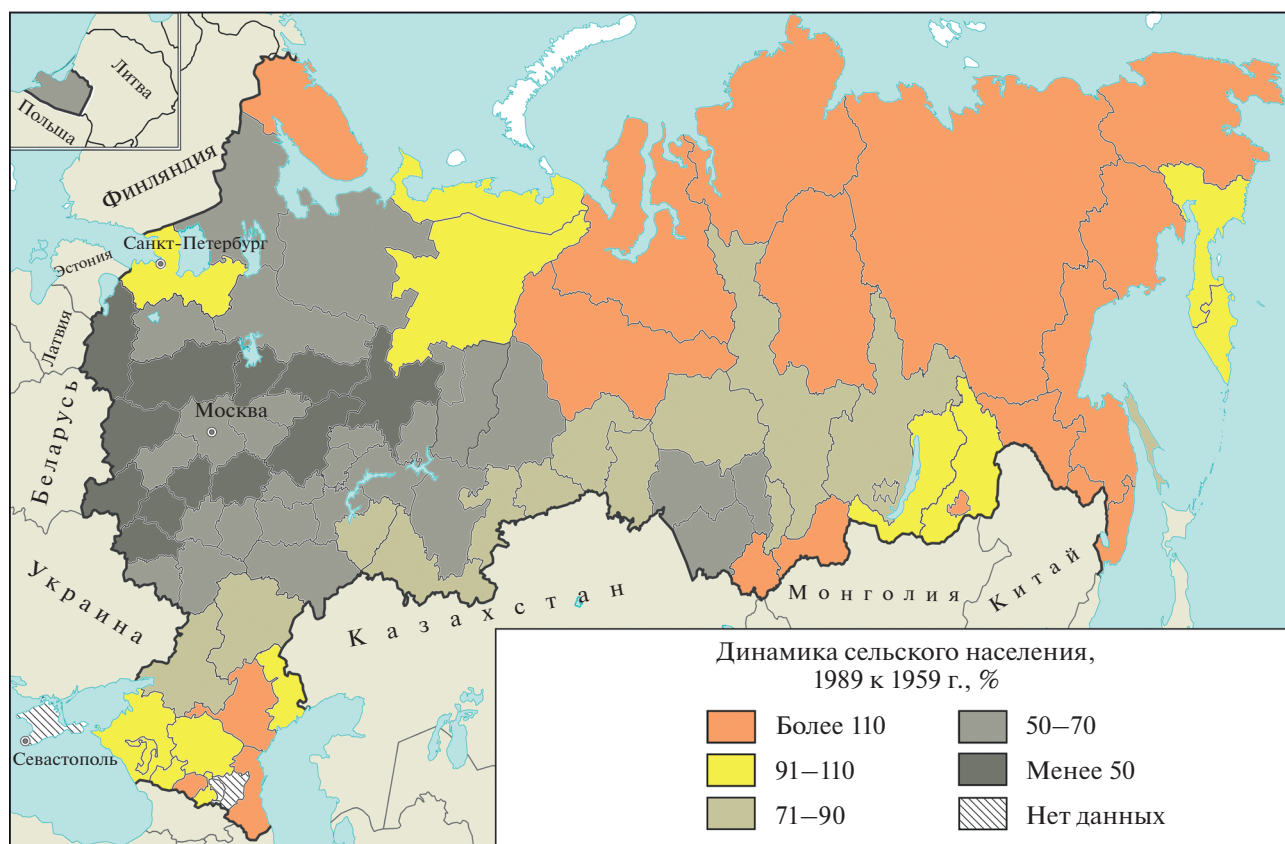


Рис. 3. Динамика сельского населения в регионах России, 1989 к 1959 г., %. Составлено по данным переписей населения 1959 и 1989 гг.

Тем не менее сама организация производства к 1970-м годам требовала реформ. Хозяйственную инициативу так и не смогла стимулировать недолгая, так называемая Косыгинская, реформа 1960-х годов с попыткой расширения хозрасчетных отношений. Не решая институциональных проблем, правительство усиливало материально-техническую оснащенность. За 1965–1990 гг. основные производственные фонды сельского хозяйства и количество вносимых удобрений увеличились шестикратно, мощности тракторного парка – пятикратно. Фондовооруженность одного работника выросла в 5 раз, а в расчете на 100 га угодий – в 4 раза. При этом половину всех вложений поглощали мощные животноводческие комплексы и мелиорация, способствовавшие расширению сельскохозяйственных угодий в районах со сложными природными условиями. Все это обеспечило прирост продукции сельского хозяйства в стоимостном выражении (в сопоставимых ценах) в 1.7 раза, а в натуральном – всего на 35–45%<sup>6</sup>. Разница связа-

на с ростом доли более дорогой мясо-молочной продукции. Зерновое хозяйство обходилось в Нечерноземье очень дорого: стоимость производства тонны зерна в советское время превышала показатели на юге России в 4–8 раз (Дронин, 2014).

При столь сильном превышении затрат над результатами социальное обустройство сильно отставало от производственных вложений, что при росте числа промышленных предприятий в городах усилило отток населения из сельской местности (Нефедова, 2013а). На периферии регионов Нечерноземья к концу 1980-х годов в сельском хозяйстве не хватало рабочих рук (Иоффе, Нефедова, 2001). Это влияло и на животноводство, в которое были вложены огромные средства. При недостатке кормов и незаинтересованности работников, надои молока на одну корову и выход мяса были низкими, что усугубляло продовольственные проблемы страны.

Рост объемов получаемого зерна, с сильными колебаниями по годам, происходил в основном за счет юго-западных регионов с лучшими природными условиями, хотя они и получили меньше вложений в этот период. В целом, доля зерновых культур, в том числе продовольственного зерна, в

<sup>5</sup> Народное хозяйство РСФСР. Стат. справочник. Стат. Управление РСФСР, 1965.

<sup>6</sup> Народное хозяйство РСФСР. Стат. справочник. Стат. Управление РСФСР, 1990.



**Рис. 4.** Производство зерна в России с 1990 по 2020 г., млн т (в весе после доработки). Составлено по данным Госкомстата и Росстата за соответствующие годы.

нечерноземных регионах со сложными природными условиями в советское время была сильно завышена. Например, в Кировской области доля зерновых площади в 1970-х годах была сравнима с Саратовской областью (соответственно 62 и 69%)<sup>7</sup>.

#### ВЛИЯНИЕ СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ И КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА РАЗВИТИЕ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА В ПОСТСОВЕТСКОЕ ВРЕМЯ

Реформы агросектора назревали. Уже вторая половина 1980-х годов была отмечена робким внедрением хозрасчета, поднявшим заинтересованность работников низовых бригад в результатах труда, без существенной трансформации самих колхозов и совхозов. При этом дотации сельскому хозяйству в позднесоветское время в среднем составляли около 80% стоимости продукции сельского хозяйства (Серова, Шик, 2007).

Сельское хозяйство вступило в реформы 1990-х годов в состоянии кризиса и в то же время — с полной неготовностью руководителей и населения кардинально менять сложившийся колхозный уклад жизни. Главные вызовы были связаны с резким уменьшением государственной поддержки предприятий, появлением реальной конкуренции за ресурсы, зачаточным состоянием рынка сбыта продукции, появившимся многообразием форм собственности, влиянием международного рынка, резким ростом цен на топливо и прочие промышленные товары при том, что подъем цен на сельскохозяйственную продукцию был ограничен платежеспособностью обедневшего населения. К тому же сократились доходы от экспорта нефти и газа, на которых держались

вливания в сельское хозяйство и масштабный импорт зерна. Помимо макроэкономических изменений, собственно реформы сельского хозяйства включали: 1) преобразование агропредприятий, 2) земельные реформы, 3) развитие крупных агропромышленных корпораций; 4) стимулирование создания частных фермерских хозяйств. И все же не столько аграрные, сколько общеэкономические реформы усугубили кризис сельского хозяйства, который можно было наблюдать к концу XX в.: объем производства всей сельскохозяйственной продукции сократился на 40%, а у предприятий (без хозяйств населения и фермерских) — на 60%. Производство зерна также сократилось к концу 1990-х годов почти вдвое (рис. 4). Доля убыточных сельскохозяйственных предприятий достигла в 1998 г. 88%.

Выход сельского хозяйства из кризиса наметился лишь с начала 2000-х годов и был связан с кардинальными географическими и институциональными переменами. Под влиянием рыночных условий растениеводство постепенно сдвигалось в южные регионы, лучше обеспеченные природными ресурсами и человеческим капиталом. Даже в пределах Центрального федерального округа вырос вклад черноземных регионов в валовое производство, не говоря уже о Южном и равнинной части Северо-Кавказского федерального округа при заметном уменьшении роли нечерноземных и восточных регионов (рис. 5). Произошло частичное возвращение к досоветской схеме размещения товарного хозяйства (см. рис. 1).

В новых условиях в Нечерноземье и на востоке страны из оборота выпали в первую очередь удаленные от крупных городов и малоплодородные, часто переувлажненные, земли (Нефедова, 2017; Meyfroidt et al., 2016; Wegren, 2014), в то время как в южных регионах землепользование почти восстановилось (рис. 6). Территориальное сжатие аг-

<sup>7</sup> Сельское хозяйство СССР. М.: Госкомстат СССР, 1988.

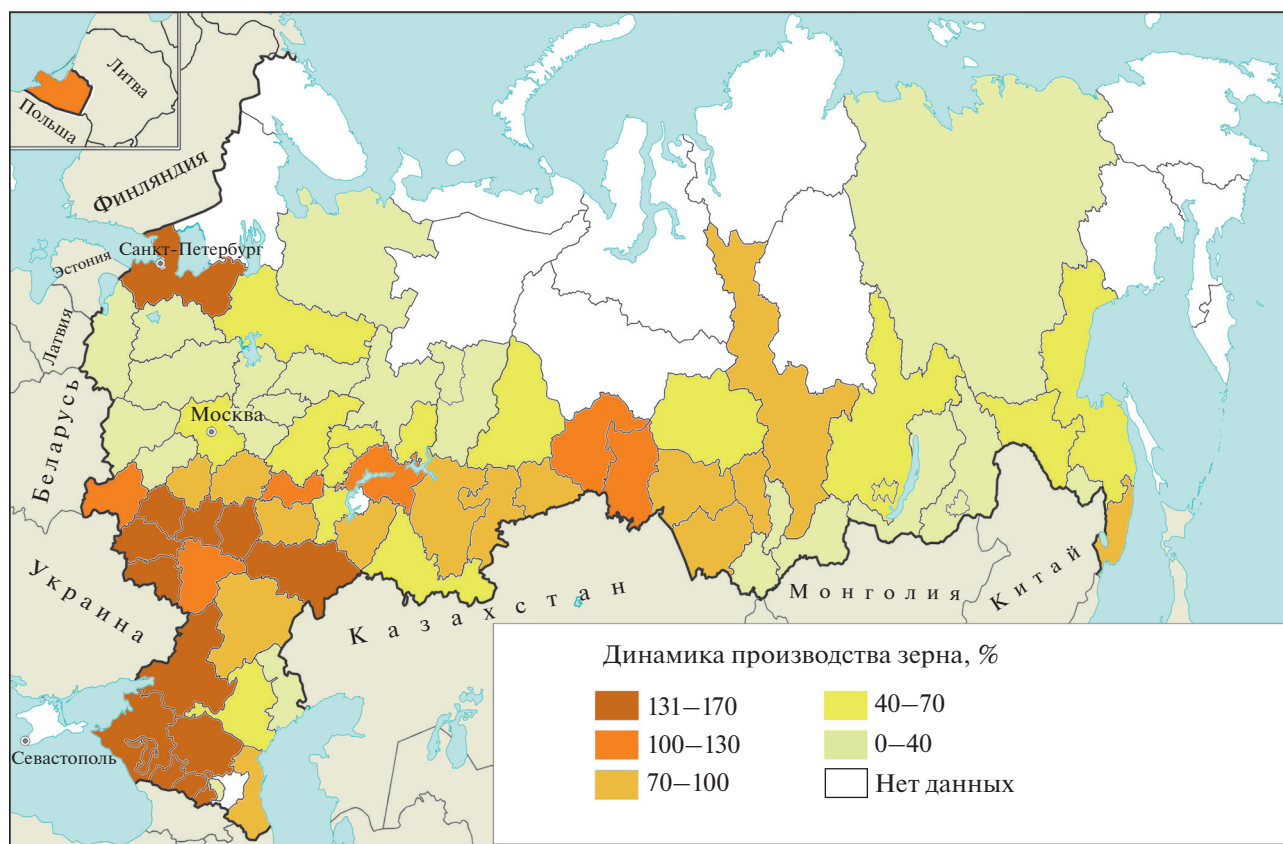
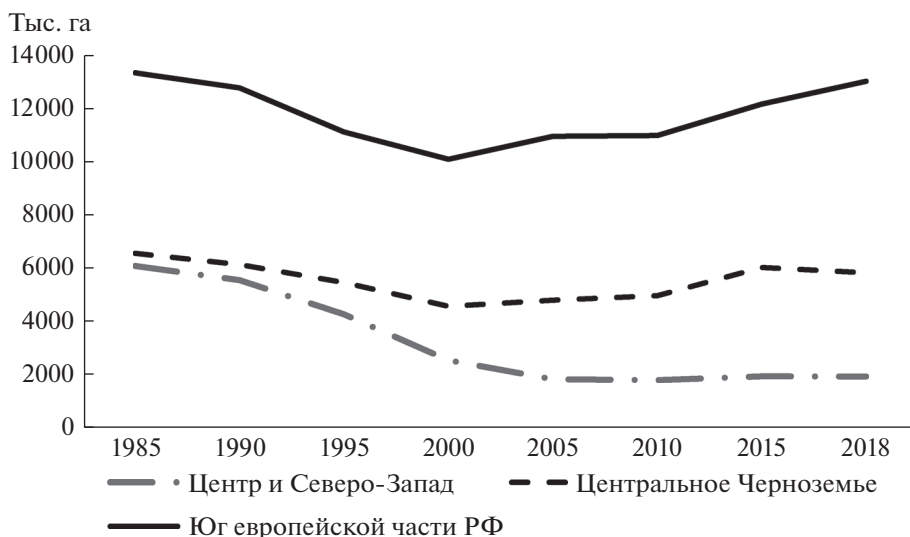


Рис. 5. Динамика производства зерна, в среднем за 2013–2017 гг. к 1986–1990 гг., %.  
 Рассчитано по данным Госкомстата и Росстата за соответствующие годы.

рарного производства характерно для большинства развитых стран мира и продиктовано внутренней логикой развития сельского хозяйства, связанной со стремлением производителей к наименьшим затратам и повышению продуктивности (Люри и др., 2010). Однако, если в лесной зоне европейской части России годовые колебания урожайности зерновых при пониженных ее показателях составляли 15–20%, то в лесостепях они увеличивались до 25–35%, а в степных засушливых районах – до 35–50% (Крючков, Раковецкая, 1990). Как это ни парадоксально, внедрение рыночных механизмов и повышение рентабельности и урожайности культур усилило зависимость растениеводства от изменений климатических и погодных условий (Дронин, 2014; Kirilenko et al., 2004).

Все это способствовало расслоению районов на южные, более заселенные с более успешным сельским хозяйством, но сильнее подверженные влиянию засух и аридизации, и прочие с умеренным климатом, где главными факторами, влияющими на результаты сельского хозяйства, стали продолжающаяся убыль сельского населения, множество заброшенных и умирающих деревень и большие потери сельскохозяйственных земель.

Ситуация осложнилась в результате общего потепления климата и расширения территории наиболее вероятных сильных атмосферных засух на юге России (Глобальный ..., 2019). Но постсоветские сельскохозяйственные производители научились к этому времени приспосабливаться к засушливым годам. Например, Новоузенский район на востоке Саратовского Заволжья, где даже артезианские источники – соленые, и воду перекачивают за сотни километров из Волги, когда то был типичным районом кочевого скотоводства. После целинной эпопеи пашня занимала в нем 3/4 сельскохозяйственных земель, хотя к концу советского периода была принята программа ее уменьшения из-за истощения почв и сильных пыльных бурь. В 1990-е годы обрабатываемые площади сжались вдвое. Овцеводство и пастбищное скотоводство в колхозах сохранялось, хотя русское население привнесло сюда свои технологии сельского хозяйства: большие поля и полустойловое содержание крупного рогатого скота. Возвращение к традиционному для этих мест животноводству было уже невозможно – казахов в районе осталось около 20%, села крупные. Предприятия старались сохранить пашню, т.к. производство зерна в удачные годы давало суще-



**Рис. 6.** Изменение посевных площадей в основных макрорегионах европейской части России с 1985 по 2018 г., тыс. га. Рассчитано по данным Госкомстата и Росстата за соответствующие годы.

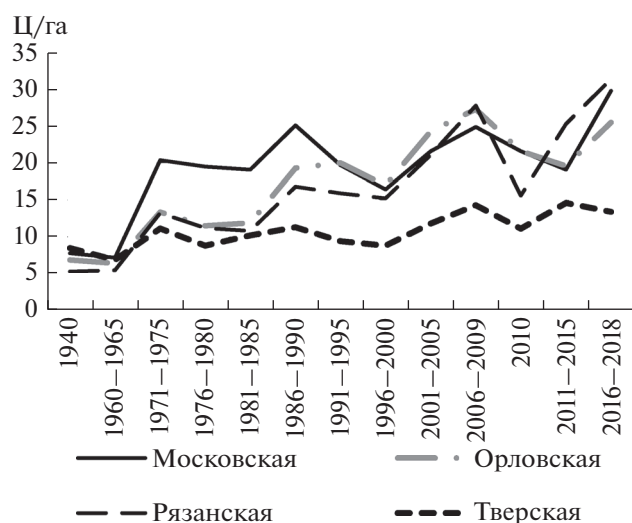
ственную прибыль, а животноводство было убыточным. Из-за повторяемости засух зерно сеяли всегда с запасом, чтобы было что продать и чем прокормить весь скот. Из десяти лет удачными бывали максимум два года, когда удавалось собрать 20 ц/га и даже больше. Еще дважды за декаду засуха уничтожала значительную часть урожая, а в остальные годы зерна собирали до 7 ц/га. Но благодаря нескольким удачным годам и полученным доходам предприятиям удалось приобрести новую технику, кое-что построить. И в целом, колхозы в начале 2000-х годов в этом засушливом районе чувствовали себя лучше, чем во многих районах Нечерноземья, особенно в периферийных, где производство зерна почти постоянно убыточно или балансирует на грани убыточности.

Иное дело – катастрофические засухи. Сильным ударом не только по сельскому хозяйству, но и по населению и всей экономике страны стала длительная засуха 2010 г., сопровождавшаяся пожарами, с температурой выше средней на 8–10°C. По данным МЧС и Рослесхоза площадь, пройденная пожарами, составляла 1.2–1.5 млн га. Независимые институты называли цифру в 6 млн га, а по данным Global Fire Monitoring Center, основывающимся на инструментальных наблюдениях из космоса, она составила 10 млн га. Причем, в отличие от предыдущих лет, когда около 90% площади пожаров приходилось на Сибирь и Дальний Восток, в 2010 г. горели леса и поля на плотно населенных территориях страны. Только в регионах, где была объявлена чрезвычайная ситуация, жили 16.5 млн. чел., а везде, где отмечалась повышенная интенсивность пожаров, – 35% населения страны. Причины катастрофических последствий пожаров и ход их распространения

неоднократно рассматривались, в том числе и автором (Нефедова, 2010, 2013а). Беда пришла с юга, где жара установилась раньше. В начале июля пожары прошли через Самарскую область, Башкирию и придвинулись к центральным районам. С середины июля увеличивается число пожаров на востоке Подмосковья, особенно на высохших торфяниках. Горели поля и сухая трава, МЧС не успевало спасать людей в деревнях. Чрезвычайная ситуация была объявлена в семи субъектах РФ: в республиках Марий Эл и Мордовии, Владимирской, Воронежской, Московской, Нижегородской и Рязанской областях. На территории еще шести субъектов РФ режим ЧС вводили частично. К ликвидации пожаров привлекали вооруженные силы и даже заключенных. В ней участвовало огромное число добровольцев. Лишь к сентябрю жара и пожары ушли на Урал и юг Сибири. И хотя основное внимание уделялось пожарам в густонаселенных районах, проблемы их обширности на малолюдном востоке остались.

В 2012 г. еще одна череда блокирующих антициклонов вызвала сильную засуху. Помимо юга Европейской России она охватила Урал, Сибирь, Якутию, приведя не только к гибели сельскохозяйственных культур, но и к нарушению судоходства. На многих метеостанциях были обновлены максимумы температур. Особенно острой была ситуация на юге Урала и Западной Сибири. А в Екатеринбурге открыли памятник самому жаркому лету за всю историю метеонаблюдений в виде гигантского вентилятора<sup>8</sup>.

<sup>8</sup> Аномальная жара в России, 2012. <https://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/1729788>.



**Рис. 7.** Урожайность зерновых культур в некоторых регионах Центральной России, в среднем за 5 лет, ц/га.

Источники: см. рис. 2 и 4.

Периодические засухи усиливали влияние институциональных и экономических факторов. Они хорошо выявляются по спадам урожаев зерна (рис. 2 и 4). В 1998 г. было получено лишь 48 млн т зерна, что соответствовало уровню 1953 г. Вместе с тогдашним дефолтом и резким ростом курса доллара это стало сильным ударом по сельскому хозяйству. В период экономической неустойчивости влияние погодных условий проявлялось особенно резко.

Несмотря на то, что засухи, вызывая колебания урожайности, охватывали огромные территории, в разных регионах России они проявлялись по-разному. При общем росте урожайности зерновых культур после 2000 г. она неизменно была выше в южных регионах, а также оставалась более высокой в пригородной Московской области, в том числе в сравнении с окружающими ее регионами Нечерноземья (рис. 7 и 8).

В отличие от природных катаклизмов, социальное опустошение сельской местности происходило весьма последовательно, продолжая после небольшого дезурбанизационного перерыва в 1990-х годах советские тенденции. Исследования соотношения состояния сельскохозяйственных предприятий, динамики сельскохозяйственных земель и сельского расселения показывали их тесную связь. Однако в последние годы в процессах сжатия освоенного пространства наметились изменения. При продолжающемся уменьшении сельского населения, значимость качества земель стала возрастать в России не только по оси север-юг, но и внутри регионов. Например, в Нечерноземье сжатие землепользования идет путями, обратными историческому освоению: сельское хозяйство уходит с позднее (в советское время)



**Рис. 8.** Урожайность зерновых культур в некоторых регионах юга европейской части России, в среднем за 5 лет, ц/га.

Источники: см. рис. 2 и 4.

освоенных сельским хозяйством территорий с менее плодородными почвами и сохраняется в ополках (хотя порой и при пониженной активности), и прежде более плотно заселенных (Нефедова, Медведев, 2020). Экспедиционные исследования ряда регионов Нечерноземья показали, что торможение сжатия землепользования и даже очаговое сельскохозяйственное реосвоение земель происходит либо ближе к областным центрам и транспортным магистралям, либо в небольших очагах с лучшими природными предпосылками.

Очаговость сельскохозяйственного реосвоения в более северных регионах усиливается не только коллапсом значительной части сельскохозяйственных организаций (бывших колхозов и совхозов) при слабом развитии в нечерноземной зоне малых частных товарных хозяйств и из-за истощения трудового потенциала. Драйверами роста не только на юге, но особенно в нечерноземных регионах, стали крупные агрохолдинги мясо-молочного профиля с полной механизацией, собственной инфраструктурой и производством значительной части кормов в своих более южных филиалах (Шагайда, Узун, 2019). Это создало отдельные очаги довольно мощного сельского хозяйства в Нечерноземье среди огромных массивов заброшенных и зарастающих мелкоземных полей.

Тем не менее катастрофические засухи могут быть разрушительны и для гигантских агрохолдингов. Например, в Татарстане относительная

устойчивость сельского хозяйства по сравнению с соседними регионами связана с меньшей сельской депопуляцией татарских сел по сравнению с русскими, с готовностью населения к самозанятости, с неплохим инфраструктурным обустройством сельской местности, более благоприятными природными условиями, но также и с мощными агрохолдингами, среди которых выделялись три крупнейших, концентрировавших более трети сельскохозяйственных угодий республики: “ВАМИН”, “Ак Барс-Агро” и “Красный Восток-Агро”. Агрохолдинги при мощной финансовой и административной поддержке правительства республики стали главной системообразующей частью АПК Татарстана (Нефедова, 2013б). Монополизм агрохолдингов поставил целые районы в зависимость от состояния одной компании. Первым ударом по холдингам стал финансовый кризис 2009 г., который выявил их сильную закредитованность. Кредиты, взятые на строительство мегаферм, должны были окупиться за 8–10 лет. Но добавились новые вызовы: вступление России в ВТО и изменение структуры поддержки АПК. При нехватке оборотных средств и стремлении скорее получить прибыль холдинги увеличили продажу зерна. Но тут случилась засуха 2010 г. В результате не хватало кормов, стали падать надои молока. Для повышения надоев пытались резать “лишний” скот, но в республике строгий административный контроль за поголовьем скота. В результате – банкротство крупнейшего холдинга “ВАМИН”, который все же удалось спасти, поменяв собственника и название. Но этот пример показывает, что засуха на фоне финансовых и институциональных проблем может стать триггером для банкротства даже таких гигантов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Любой кризис – природный, экономический, социальный – высвечивает хронические проблемы общества. В периоды экономической и политической неустойчивости последствия изменения климатических и погодных условий проявлялись особенно резко. Именно поэтому перспективы развития сельского хозяйства и сельских территорий необходимо рассматривать комплексно.

Периодические засухи в России в XX и XXI вв., связанные с многолетними изменениями климата и природным опустыниванием, во многом служили спусковым механизмом кризисов сельского хозяйства, в то время как тяжесть их последствий была связана с институциональными, политическими, экономическими, социальными проблемами общества и сельскохозяйственного производства. Тем более, что сами засухи и связанные с ними пожары, за исключением наиболее катастрофических, порой провоцировались деятельностью человека.

Трансформация экономики в XXI в. привела к сжатию сельскохозяйственного землепользования и сдвигу растениеводства в более южные регионы, наиболее подверженные влиянию высоких температур и засушливости. В России это сделало сельское хозяйство более рентабельным, но менее устойчивым к изменению климата и неожиданным флуктуациям погоды. Влияние общих тенденций природного опустынивания на сельское хозяйство в XXI в. возрастет. Но все же его состояние в значительной степени зависит от социально-экономических условий.

Наиболее благоприятные перспективы развития сельского хозяйства имеют три типа регионов России: 1) южные равнинные регионы с наиболее благоприятными природными предпосылками, инвестиционной привлекательностью прибыльного сельского хозяйства, миграционно привлекательные для населения; 2) некоторые республики, сохранившие трудовой потенциал и готовность населения заниматься сельским хозяйством; 3) пригороды региональных центров в более северных и восточных регионах, в том числе в Московской и Ленинградской областях (как это ни парадоксально), а также регионы, примыкающие к Московской области с юга с повышенными инвестициями в агропроизводство и притоком мигрантов (Нефедова, Медведев, 2020; Мкртчян, 2018). В Нечерноземье за пределами зоны влияния пригородов мелкооселенное расселение, отрицательный миграционный баланс, сильная естественная убыль стареющего населения, слабая бытовая инфраструктура имеют синергетический эффект, ведущий к социальному опустыниванию, отрицательно влияя на сельское хозяйство. Однако и здесь за пределами пригородов происходит возрождение отдельных предприятий на новых инвестициях из крупных городов и/или благодаря сильным руководителям. Роль личности в сложных современных институциональных условиях возросла.

В целом, можно говорить о разных путях развития сельской местности в северных и южных регионах страны. В лесных и отчасти лесостепных регионах главным ограничителем развития сельской местности служат не только мелкоконтурность угодий и сложность природных условий, но и социальная среда. Различия внутри регионов здесь, как правило, гораздо сильнее межрегиональных. При формировании очаговой индустриальной сельской экономики, благодаря в основном крупным агрохолдингам, и при сокращении личного подсобного хозяйства населения, для этих регионов характерна высокая сельская безработица. Она усиливается политической объединенности поселений и сжатия числа рабочих мест в социальной сфере, что пролонгирует миграции сельского населения в города и ближе к ним. Это ведет к продолжению социально-экономического опустынивания территории. При вос-

становлении природных ландшафтов на части этих земель происходит полное изменение функций поселений благодаря разнообразию расположенных здесь дач жителей крупных городов, а также покупке ими домов в деревнях как второго сезонного жилья (Между домом ..., 2016). Это отчасти позволяет затормозить социальное опустынивание.

Степные районы при более плотной сети сельского расселения, сохранении ведущей роли сельского хозяйства и его модернизации, нуждаются в усилении полифункциональности, что необходимо для повышения устойчивости сельской экономики. Изменение организационной структуры, появление агрохолдингов и фермерских хозяйств, требующих гораздо меньше занятых, чем советские колхозы, также привело при слабо развитой сфере обслуживания к увеличению безработицы в крупных селах и станицах, усилению миграций на постоянное место жительства и возвратных трудовых миграций в города. Увеличение роли растениеводства при изменении специализации в сторону расширения посевов зерновых делает эти регионы более уязвимыми к природным катаклизмам. Из-за территориального сжатия молочного животноводства и резкого уменьшения посевов кормовых культур и трав нарушаются севообороты, отсутствуют органические удобрения, что способствует усилению природного опустынивания.

Очевидно, что при столь сильных природных, социальных и экономических пространственных различиях развитие сельского хозяйства и землепользования в разных регионах связано с определенным набором возможностей и ограничений. Главное – избегать унификации подходов к развитию сельского хозяйства и сельской местности в разных субъектах РФ и разных муниципальных районах, учитывать их природные, социально-демографические и экономические ограничения и преимущества.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в Институте географии РАН по теме государственного задания ИГ РАН № 0148-2019-0008.

#### FUNDING

The study was carried out within the state-ordered research theme of the Institute of Geography RAS, no. 0148-2019-0008.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

*Александров Ю.Г.* Будущее колхозно-совхозного строя в России // Крестьянство и индустриальная цивилизация. М.: Наука, 1993. С. 13–55.

Атлас. Климат и жизнедеятельность населения России / А.Н. Золотокрылин, В.В. Виноградова, О.Б. Глезер. М.: Институт географии РАН, 2020. 68 с.

Глобальный климат и почвенный покров России. Опустынивание и деградация земель, институциональные, инфраструктурные, технологические меры адаптации (сельское и лесное хозяйство). Национальный докл. М.: ООО Изд-во МБА, 2019. Т. 2. 476 с.

*Гордеев А.В., Клещенко А.Д., Черняков Б.А., Сиротенко О.Д.* Биоклиматический потенциал России: теория и практика. М.: КМК, 2006. 508 с.

*Дронин Н.М.* Изменение климата и продовольственная безопасность России. М.: ГЕОС, 2014. 304 с.

*Иоффе Г.В., Нефедова Т.Г.* Центр и периферия в сельском хозяйстве российских регионов // Проблемы прогнозирования. 2001. № 6. С.100–110.

*Кондрашин В.В.* Голод 1932–1933 годов в деревнях Поволжья // Вопросы истории. 1991. № 6. С. 176–181.

*Кондрашин В.В.* Голод 1932–1933 годов. Трагедия российской деревни: науч. изд. М.: “Росспэн”, 2008. 520 с.

*Крючков В.Г., Раковецкая Л.И.* Зерновое хозяйство: территориальная организация и эффективность производства. М.: Изд-во Моск. гос. ун-та, 1990. 135 с.

*Люри Д.И., Горячкин С.В., Караваева Н.А., Денисенко Е.А., Нефедова Т.Г.* Динамика сельскохозяйственных земель России в XX веке и постагрогенное восстановление растительности. М.: ГЕОС, 2010. 416 с.

Между домом и... домом. Возвратная пространственная мобильность населения России / ред. Т.Г. Нефедовой, К.В. Аверкиевой, А.Г. Махровой. М.: Новый Хронограф, 2016. 504 с. <http://ekonom.ig-gas.ru/data/bhah2016.pdf>

*Мкртчян Н.В.* Региональные столицы и их пригороды: особенности миграционного баланса // Изв. РАН. Сер. геогр. 2018. № 6. С. 26–38. <https://doi.org/10.1134/S2587556618060110>

*Нефедова Т.Г.* Хроника, пространство и причины горячего лета-2010 // География. Издат. Дом “Первое сентября”, 2010. № 21 (917). С. 4–11.

*Нефедова Т.Г.* Десять актуальных вопросов о сельской России. Ответы географа. М.: URSS, 2013а. 452 с.

*Нефедова Т.Г.* Достижения и провалы сельского Татарстана // География. Издат. Дом “Первое сентября”, 2013б. № 5 (952). С. 7–13.

*Нефедова Т.Г.* Двадцать пять лет постсоветскому сельскому хозяйству России: географические тенденции и противоречия // Изв. РАН. Сер. геогр. 2017. № 5. С. 7–18. <https://doi.org/10.7868/S0373244417050012>

*Нефедова Т.Г., Медведев А.А.* Сжатие освоенного пространства в центральной части Европейской России: динамика населения и использования земель в сельской местности // Изв. РАН. Сер. геогр. 2020. Т. 84. № 5. С. 645–659. <https://doi.org/10.31857/S258755662005012X>

*Серова Е.В., Шик О.В.* Мировая аграрная политика. М.: Издательский дом ГУ ВШЭ, 2007.

- Шагайда Н.И., Узун В.Я.* Драйверы роста и структурных сдвигов в сельском хозяйстве России. М.: Издат. Дом “Дело”. Научн. Доклады РАНХиГС, 2019. № 4 (19). 96 с.
- Чибилев А.А.* Экологические уроки целины // География. Издат. Дом “Первое сентября”, 2004. № 10. Экономическая география. Т. 2: СССР / под ред. Н.Н. Баранского. М.: Изд-во Коммунистического ун-та им. Я.М. Свердлова, 1929.
- Kirilenko A., Alcamo J., Dronin N., Golubev G., Endeyan M.* Modeling the impact of climate changes on agriculture in Russia // *Dokl. Earth Sci.* 2004. № 397 (5). P. 682–685.
- Meyfroidt P., Schierhorn F., Prishchepov A., Müller D., Kuehmerle T.* Drivers, constraints and trade-offs associated with recultivating abandoned cropland in Russia, Ukraine, and Kazakhstan // *Global Environ. Change.* 2016. Vol. 37. P. 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.01.003>
- Wegren S.K.* Rural inequality in post-Soviet Russia // *Problems of Post-Communism.* 2014. Vol. 61 (1). P. 52–64. <https://doi.org/10.2753/PPC1075-8216610104>

## Spatial Differentiation of Agricultural Production in Russia in Conditions of Natural and Social Desertification

T. G. Nefedova\*

*Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

\*e-mail: [trene12@igras.ru](mailto:trene12@igras.ru)

The article considers the change of three main factors of spatial transformation of agriculture: natural, institutional-economic, and social. It shows how the results of agriculture historically changed depending on fluctuations in natural conditions, including periodic droughts. To identify relatively prosperous and crisis periods the change in moisture in the 20th and 21st centuries and the indicator of grain production were used. Examples of the catastrophic impact of droughts and adaptation to them in certain regions are given. Any crisis, including natural, highlights the chronic socioeconomic problems of the economy organization. The socioeconomic differentiation of rural areas, associated with remoteness from cities and transport highways, significantly affects the provision of agricultural production with labor resources. The latter depends on the duration and scale of rural depopulation and modern migration processes, which in some areas lead to social desertification, which is also disastrous for agriculture. Although the post-Soviet institutional transformations operated throughout the country, they had different consequences in the areas with different natural conditions, including in areas of waterlogging and natural desertification. An important factor in the spatial differentiation of agricultural results is the combination of organizational forms of management in different regions: from agricultural holdings to personal subsidiary farms. The result was a change in the specialization of production in a number of regions, an increase in its organizational and spatial polarization and concentration, although it led to an overall increase in the volume of agricultural production in the country. The main consequence of the transformation processes of post-Soviet Russia was the compression of agricultural land use and the shift of grain production to the southern regions. This made it more sensitive to climatic and weather fluctuations, despite the modernization of production.

*Keywords:* agriculture, grain production, droughts, natural desertification, rural settlement pattern, spatial polarization, social desertification

### REFERENCES

- Aleksandrov Yu.G. The future of the collective-state farm system in Russia. In *Krest'yanstvo i industrial'naya tsivilizatsiya* [Peasantry and Industrial Civilization]. Moscow: Nauka Publ., 1993, pp. 13–55. (In Russ.).
- Atlas. Klimat i zhiznedeyatel'nost' naseleniya Rossii* [Atlas. Climate and Vital Activity of the Population in Russia]. Zolotokrylin A.N., Vinogradova V.V., Glezer O.B., Eds. Moscow: Inst. Geogr. RAN, 2020. 68 p.
- Chibilev A.A. Ecological lessons of virgin land. *Geografiya*, 2004, no. 10. Available at: <https://geo.isept.ru/article.php?ID=200401003> (accessed: 04.11.2021). (In Russ.).
- Dronin N.M. *Izmenenie klimata i prodovol'stvennaya bezopasnost' Rossii* [Climate Change and Food Security in Russia]. Moscow: GEOS Publ., 2014. 304 p.
- Ekonomicheskaya geografiya* [Economic Geography]. Vol. 2: *SSSR* [USSR]. Baranskii N.N., Ed. Moscow: Kommunist. Univ. im. Ya.M. Sverdlova, 1929.
- Global'nyi klimat i pochvennyi pokrov Rossii. Opustynivanie i degradatsiya zemel', institutsional'nye, infrastrukturalnye, tekhnologicheskie mery adaptatsii (sel'skoe i lesnoe khozyaistvo)* [Global Climate and Soil Cover of Russia. Desertification and Land Degradation, Institutional, Infrastructural, Technological Adaptation Measures (Agriculture and Forestry)]. Moscow: MBA Publ., 2019, vol. 2. 476 p.
- Gordeev A.V., Kleshchenko A.D., Chernyakov B.A., Sirotenko O.D. *Bioklimaticheskii potentsial Rossii: teoriya i praktika* [The Bioclimatic Potential of Russia: Theory and Practice]. Moscow: KMK Publ., 2006. 508 p.



- Ioffe G.V., Nefedova T.G. Center and periphery in agriculture of Russian regions. *Problemy Prognozirovaniya*, 2001, no. 6, pp. 100–110. (In Russ.).
- Kirilenko A., Alcamo J., Endeyan M., Golubev G., Dronin N. Modeling the impact of climate changes on agriculture in Russia. *Dokl. Earth Sci.*, 2004, vol. 397, no. 5, pp. 682–685.
- Kondrashin V.V. *Golod 1932–1933 godov. Tragediya rossiiskoi derevni* [The Famine of 1932–1933. The Tragedy of the Russian Village]. Moscow: Rosspen Publ., 2008. 520 p.
- Kondrashin V.V. The Famine of 1932–1933 in the villages of the Volga region. *Vopr. Istorii*, 1991, no. 6, pp. 176–181. (In Russ.).
- Kryuchkov V.G., Rakovetskaya L.I. *Zernovoe khozyaistvo: territorial'naya organizatsiya i effektivnost' proizvodstva* [Grain Farming: Territorial Organization and Production Efficiency]. Moscow: Mosk. Gos. Univ., 1990. 135 p.
- Lyuri D.I., Goryachkin S.V., Karavaeva N.A., Denisenko E.A., Nefedova T.G. *Dinamika sel'skokhozyaistvennykh zemel' Rossii v XX veke i postagrogennoe vosstanovlenie rastitel'nosti i pochv* [Dynamics of Agricultural Lands of Russia in 20th Century and Postagrogenic Restoration of Vegetation and Soils]. Moscow: GEOS Publ., 2010. 416 p.
- Meyfroidt P., Schierhorn F., Prishchepov A., Müller D., Kuemmerle T. Drivers, constraints and trade-offs associated with recultivating abandoned cropland in Russia, Ukraine, and Kazakhstan. *Glob. Environ. Change*, 2016, vol. 37, pp. 1–15.  
<https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.01.003>
- Mezhdum domom i...domom. Vozvratnaya prostranstvennaya mobil'nost' naseleniya Rossii* [Between Home and ... Home. The Return Spatial Mobility of Population in Russia]. Nefedova T.G., Averkieva K.V., Makhrova A.G., Eds. Moscow: Novyi Khronograf Publ., 2016. 504 p.
- Mkrtychyan N.V. Regional capitals of Russia and their suburbs: specifics of the migration balance. *Reg. Res. Russ.*, 2019, vol. 9, pp. 12–22.  
<https://doi.org/10.1134/S2079970519010076>
- Nefedova T.G. *Desyat' aktual'nykh voprosov o sel'skoi Rossii. Otveti geografa* [Ten Topical Issues about Rural Russia. Answers of the Geographer]. Moscow: URSS Publ., 2013a. 452 p.
- Nefedova T.G. Achievements and failures of rural Tatarstan. *Geografiya*, 2013b, vol. 952, no. 5, pp. 7–13. (In Russ.).
- Nefedova T.G. Hot summer 2010: chronicle, space and causes of forest fires. *Geografiya*, 2010, vol. 917, no. 21, pp. 4–11. (In Russ.).
- Nefedova T.G. Twenty-five years of Russia's post-Soviet agriculture: Geographical trends and contradictions. *Reg. Res. Russ.*, 2017, vol. 7, pp. 311–321.  
<https://doi.org/10.1134/S2079970517040074>
- Nefedova T.G., Medvedev A.A. Shrinkage of active space in Central Russia: population dynamics and land use in countryside. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2020, vol. 84, no. 5, pp. 645–659. (In Russ.).  
<https://doi.org/10.31857/S258755662005012X>
- Serova E.V., Shik O.V. *Mirovaya agrarnaya politika* [World Agrarian Policy]. Moscow: GU VShE Publ., 2007. 406 p.
- Shagaida N.I., Uzun V.Ya. *Draivery rosta i strukturnykh sdvigo v sel'skom khozyaistve Rossii* [Drivers of Growth and Structural Shifts in Agriculture in Russia]. Sci. Reports of the RANEPa, no. 4 (19). Moscow: Delo Publ., 2019. 96 p.
- Wegren S.K. Rural inequality in post-Soviet Russia. *Probl. Post-Communism*, 2014, vol. 61, no. 1, pp. 52–64.  
<https://doi.org/10.2753/PPC1075-8216610104>

## ПРОБЛЕМЫ ДЕГРАДАЦИИ ЗЕМЕЛЬ И УСТОЙЧИВОГО ЗЕМЛЕПОЛЬЗОВАНИЯ

УДК 502.338:630\*43+58.056+528.88

### ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА НА ЭКОСИСТЕМНЫЕ УСЛУГИ ЛЕСНЫХ ЗЕМЕЛЬ ЮГА ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ

© 2022 г. Б. З. Цыдыпов<sup>а</sup>, \*, Е. Ж. Гармаев<sup>а</sup>, Б. О. Гомбоев<sup>а</sup>, А. А. Аюржанаев<sup>а</sup>, Б. В. Содномов<sup>а</sup>,  
С. Д. Пунцукова<sup>а</sup>, С. Г. Андреев<sup>а</sup>, М. А. Мотошкина<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Байкальский институт природопользования Сибирского отделения РАН, Улан-Удэ, Россия

\*e-mail: bz61@binm.ru

Поступила в редакцию 15.07.2021 г.

После доработки 10.09.2021 г.

Принята к публикации 12.10.2021 г.

Определены особенности трансформации отдельных компонентов природной среды в районах юга Восточной Сибири (подробно проанализирована территория Бурятии) в условиях изменения климата, которые оказывают критическое влияние на экосистемные услуги лесных земель. Применена система последовательных и взаимодополняемых методов, позволяющая объективно провести анализ этого влияния и его оценку: методы дистанционного зондирования, картографирования, корреляционный анализ, методы выявления общей экономической ценности и “адаптации на основе экосистем”. Рассчитаны тренды температуры воздуха, количества осадков и нормированного разностного вегетационного индекса NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) для влажного (1982–1999 гг.) и засушливого (2000–2018 гг.) периодов. Рост температуры, как наиболее критический параметр состояния лесных земель, наблюдается для всей территории исследования; при этом зоны с невысокими темпами роста приземной температуры перемежаются с зонами с высокими темпами роста, как в широтном, так и в долготном направлениях. Влажный период характеризуется положительными трендами суммы осадков практически для всей территории юга Восточной Сибири. В засушливый период наблюдается отрицательная динамика количества выпавших осадков для преобладающей части рассматриваемой территории. Влажный период отмечен почти повсеместным ростом NDVI. В засушливый период для лесной растительности характерна разнонаправленность трендов NDVI и осадков; здесь влияние на динамику NDVI оказывает температура. Указанные закономерности предопределяют и изменения в развитии экосистемных услуг лесных земель. Определено, что изменение климата негативно влияет на преобладающую часть экосистемных услуг лесных земель. Наибольшее негативное влияние за длительный период наблюдений (1936–2015 гг.) оказали лесные пожары, которые к концу указанного периода значительно возросли как по количеству, так и по площади распространения. Рассмотрен комплекс мер, способствующих адаптации управления лесными землями к изменению климата.

*Ключевые слова:* изменение климата, NDVI, тренды, экосистемные услуги, лесные пожары, адаптация, лесные земли юга Восточной Сибири

DOI: 10.31857/S2587556622010125

#### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

При постановке проблемы применен следующий алгоритм: выявление изменения климата на рассматриваемой территории с выделением двух периодов (влажного и засушливого) > влияние данного изменения на лесные земли в районе исследований > выявление последствий указанного влияния > изучение деформации функций лесных земель вследствие выявленных последствий или изменения объемов экосистемных услуг леса > разработка мер по адаптации к выявленным последствиям.

При этом в пространственном аспекте применен “принцип матрешки”, когда изменение кли-

мата рассматривается на более обширной территории севера Центральной Азии для обнаружения значимых трендов приземной температуры воздуха и количества осадков, оказавших критическое влияние на состояние лесных земель. Само состояние лесных земель рассмотрено для территории Республики Бурятия в составе административных районов для более крупномасштабной оценки потерь лесного покрова по данным дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). И, наконец, расчет экосистемных услуг леса осуществлен для российской части бассейна р. Селенги (БРС) как более детальный анализ оценки и тенденций развития указанных услуг в связи с изменением климата. Данный принцип также согласуется

с известным положением об “игре масштабами” Н.Н. Баранского, когда в рассматриваемом нами случае от общих положений изменения климата на обширной территории осуществляется переход к более детальным последствиям данного изменения на меньших территориях.

**Изменение климата.** Начиная со второй половины 1970-х годов наблюдается повышение темпов потепления глобального климата. Оно подтверждается многолетними данными станций сети Всемирной метеорологической организации и национальных сетей (Кокорин, 2014). В XX в. и в нынешнем столетии выделяются три интервала смены направлений изменения климата: потепление 1910–1945 гг., слабое похолодание 1946–1975 гг. и наиболее интенсивное потепление после 1970-х годов по настоящее время (Гармаев и др., 2017). На рубеже 1980–90-х годов потепление произошло скачкообразно. Последние годы отмечены особенно высокими температурами воздуха (Обязов, 2015). В России изменения в сторону повышения температуры воздуха выражены сильнее, чем на планете в целом (Второй ..., 2014).

Следует отметить, что глобальное потепление климата в последние десятилетия имеет отчетливое проявление на территории северной части Центральной Азии, особенно в Забайкалье. Этому способствуют следующие факторы: 1) внутриконтинентальное расположение; 2) общая приподнятость территории над уровнем моря; 3) особенности атмосферной циркуляции (Antokhina et al., 2015). С 1885 по 2012 г. среднегодовая температура воздуха повысилась здесь на  $2.0^{\circ}\text{C}$  (Обязов, 2015), на планете в то же время она увеличилась на  $0.85^{\circ}\text{C}$  (Кокорин, 2014). Установлено, что с 70-х годов XX в. темпы потепления в Улан-Удэ выросли до  $0.36^{\circ}\text{C}/10$  лет, в Новоселенгинске потепление происходит с темпом  $0.18^{\circ}\text{C}/10$  лет, а в Кяхте –  $0.16^{\circ}\text{C}/10$  лет (Гармаев и др., 2017). Длительные вариации количества осадков имеют выраженную цикличность (Андреев и др., 2016), при этом последняя засушливая фаза началась в 1999 г. (Обязов, Смахтин, 2012), которая является рекордной по продолжительности за весь период инструментальных наблюдений.

**Лесные пожары.** Глобальное потепление климата, более интенсивно проявляющееся в рассматриваемом регионе, оказывает негативное влияние на расположенные здесь лесные земли. Исследуемый регион характеризуется контрастностью природных процессов, где периодически повторяющиеся засухи и сопутствующие им лесные пожары чередуются с разрушительными кратковременными паводками, вызывающими катастрофические наводнения. По данным Росгидромета, за последние 15 лет число опасных гидрометеорологических явлений выросло в 2 раза. По одному из сценариев изменения климата,

основанному на модели общей циркуляции атмосферы, длительность пожароопасного сезона в среднем широтном поясе России может увеличиться на 50–60 дней, т.е. на 30–40%. Увеличение длительности опасных сезонов приведет к росту общего числа пожаров на 30–41% (Доклад ..., 2019).

Исследование причин и масштабов лесных нарушений на глобальном и региональном уровнях является важным направлением при выработке решений по устойчивому управлению лесными ресурсами. Составляя большую часть биомассы Земли, лес обеспечивает спектр функций от средообразующих и климаторегулирующих до рекреационных и сырьевых. В результате оценки глобального изменения лесного покрова в рамках проекта Продовольственной и сельскохозяйственной организации ООН выявлено уменьшение площади лесов на 3% с 1990 по 2015 г. (Global ..., 2015). Наибольшее снижение характерно для тропических лесов, незначительное колебание – для бореальных и субтропических лесов, а увеличение – для лесов умеренной зоны (Keenan et al., 2015). Очевидно, что оценки в разных регионах будут существенно отличаться друг от друга. Для территории Российской Федерации выявлен значительный разброс оценок площади леса и его потерь; при этом отмечается, что снижение лесопокрываемых площадей характерно для высоких широт и Забайкалья (Schepaschenko et al., 2015). Также существует проблема несоответствия статистических данных различных ведомств (Сидоров, Санжиева, 2018). Подобные глобальные, национальные и региональные оценки (в том числе субрегиональные) необходимы для решения ряда задач, связанных с защитой леса, моделированием углеродного цикла, определением ресурсного потенциала и др., и требуют привлечения разнообразных методов и средств, но ключевым источником среди них являются методы дистанционного зондирования.

**Оценка динамики потерь леса по данным ДЗЗ.** Важнейшей информацией, которая позволяет исследовать происходящие на поверхности Земли процессы, являются данные ДЗЗ. С их помощью решается обширный класс задач, связанных с оценкой изменения климата, мониторингом стихийных бедствий, изучением динамики геосистем и т.д. При этом исследование вариаций характеристик растительного покрова с помощью данных ДЗЗ приобретает особое значение на фоне происходящих климатических изменений (Медведева и др., 2011). Спутниковые данные применяются для решения целого ряда научных проблем, включая вопросы мониторинга и моделирования изменений лесного покрова под влиянием природных и антропогенных факторов. Современные подходы к изучению нарушенности лесного покрова в значительной степени основаны на долгосрочном мониторинге и простран-

ственно-временном анализе динамики лесного покрова (Барталев и др., 2010, 2012, 2014).

Одним из наиболее распространенных направлений дистанционной оценки площадей гарей и степени повреждения растительного покрова после пожаров является использование различных вегетационных индексов, полученных в результате обработки разновременных снимков среднего и низкого пространственного разрешения спутников *Landsat* и *MODIS*. Это объясняется наличием мультиспектральных каналов в видимой и инфракрасной зонах электромагнитного спектра, приемлемым уровнем пространственного разрешения для проведения тематического картографирования, большой архивной базой данных снимков, начиная с 1970-х годов.

Многочисленными исследованиями была выявлена тесная корреляционная связь между показателями степени повреждения полога леса и значениями индексов вегетации. Среди последних наиболее распространен нормированный разностный вегетационный индекс NDVI, основывающийся на поглощении и отражении растительностью электромагнитного излучения в красном и ближнем инфракрасном диапазонах соответственно. NDVI часто используется исследователями при работе как с единовременными, так и с разновременными (до и после пожара) изображениями (Барталев и др., 2010; Escuin et al., 2008). Значительно реже при оценке гарей применяются индекс гарей BAI (*Burn Area Index*) и почвенный вегетационный индекс SAVI (*Soil Adjusted Vegetation Index*). В последние годы широкое применение находят композитный индекс гарей CBI (*Composite Burn Index*) и нормированный индекс гарей NBR (*Normalized Burn Ratio*) (Escuin et al., 2008; Kasischke et al., 2008; Loboda et al., 2007). Учеными Института космических исследований РАН предложена оценка степени повреждения лесов пожарами по разновременным спутниковым снимкам MODIS на основе коротковолнового вегетационного индекса SWVI (*Short-Wave Vegetation Index*) (Барталев и др. 2010; Стыценко и др., 2013).

В рамках наших исследований было предусмотрено проведение актуальной оценки динамики площади леса исследуемой территории по материалам ДЗЗ. Важность данной оценки обуславливается также и тем, что предыдущие оценки основывались лишь на статистических данных (Борисова, 2017; Доржиев и др., 2017; Сидоров, Санжиева, 2018), которые, однако, могут значительно расходиться с данными ДЗЗ (Содномов и др., 2020).

**Экосистемные услуги.** Глобальное изменение климата несет в себе как угрозы, так и новые возможности для развития различных территорий, а также необходимость разработки региональных мер по смягчению негативного влияния изменения климата и адаптации к последствиям клима-

тических изменений. В этих условиях актуальными становятся оценка и анализ объемов и динамики изменений в общей экономической ценности экосистемных услуг, включая возникающие риски. Эти риски выражаются в проявлении и частоте возникновения экстремальных природных и техногенных явлений – засух, лесных пожаров, наводнений, изменения состояния водных ресурсов и загрязнения воздуха. Оценка экосистемных услуг как ключевой части “зеленой” экономики активно разрабатывается и в России (Бобылев и др., 2012; Тишков, 2010; Экосистемные ..., 2016, 2020). При этом упор делается на расчет показателя скорректированных чистых накоплений, который учитывает потери природных благ в социально-экономическом развитии страны и ее субъектов. Предлагаемый нами подход позволяет расширить оценку причин изменения экосистемных услуг лесных земель исследуемого региона в контексте глобального и регионального потепления климата и следующего за этим возникновения условий ухудшения состояния лесных земель вследствие возникновения, главным образом, пожароопасных состояний рассматриваемой территории.

В статье представлены результаты оценки экосистемных услуг леса как важнейшей части природных ресурсов на российской части бассейна р. Селенги. Также представлен анализ динамики лесных пожаров на рассматриваемой территории как приоритетного экстремального природного явления, обусловленного природными и антропогенными факторами, частота и распространение которого являются одним из последствий глобального изменения климата.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

**Район исследований.** Районы юга Восточной Сибири подвержены потере лесопокрываемых территорий. В Республике Бурятия, входящей в состав региона, эти территории занимают около 85% площади. Лесной фонд республики постоянно изменяется, причем основную роль в этих изменениях играют лесные пожары (Государственный ..., 2018). Помимо пожаров на состояние лесов оказывает влияние целый ряд негативных антропогенных и природных факторов. Это, например, промышленные выбросы в атмосферу и, как следствие, ее загрязнение, вырубки, воздействие насекомых-вредителей, болезни деревьев и т.д., которые приводят к снижению продуктивности, нарушению устойчивости и уничтожению лесных массивов.

Преобладающими породами являются лиственница сибирская, сосна обыкновенная и сосна сибирская (кедр), которые образуют легкогоримые светлохвойные леса, что вкупе с весенней засухой (как и засушливым климатом в целом) приводит к регулярным пожарам (Евдокименко,

Иванов, 2017). Распространена коммерческая рубка леса, стимулируемая инвестициями из КНР (Шуфан и др., 2018). Вредители (сибирский коконопряд, пилильщик сосновый и др.) и возбудители болезней способствуют масштабному повреждению леса (Ставников, 2013). Хотя и не обширное, но ранее не описанное в литературе деструктивное воздействие на кедровый древостой в Бурятии могут оказывать сильные ветры в сочетании с постоянным антропогенным прессом. Шквальные ветры приводят к образованию ветровалов на средневысотных горных хребтах в районах, где ведется добыча кедрового ореха (Черных и др., 2019).

**Климатические и метеорологические данные.** Проведен анализ многолетних рядов температуры воздуха и атмосферных осадков в целом по бассейну оз. Байкал на основе материалов метеостанций и глобальной геопространственной базы данных метеопараметров CRU TS 4.03 (*Climate Research Unit*, пространственное разрешение  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ ) (Dabaeva et al., 2016; Harris et al., 2014).

Данные по осадкам (Р) и температуре (Т) на метеостанциях получены с сервера Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации – Мирового центра данных ([www.meteo.ru](http://www.meteo.ru)) и использованы для оценки состояния увлажненности по годам (Булыгина и др., 2015). Для каждой метеостанции проведен расчет аномалий Р и Т весеннего и летнего периодов. Также проведена оценка влагообеспеченности территорий по ГТК – гидротермическому коэффициенту Г.Т. Селянинова (отношение десятикратной суммы осадков в миллиметрах за период с температурами выше  $10^\circ\text{C}$  к сумме температур в градусах за то же время), который был рассчитан по суточным данным Р и Т к 1 августа до наступления обильных осадков.

**Оценка долговременных вариаций характеристик растительного покрова.** Использован разработанный алгоритм оценки долговременных вариаций характеристик растительного покрова по NDVI, который характеризует запас надземной фитомассы. Алгоритм содержит процедуры предварительной обработки данных: восстановление отсутствующих значений, сглаживание временного ряда фильтром Савицкого–Голея (Содномов и др., 2018). Полученные после удаления сезонной компоненты значения NDVI используются для построения линейной регрессии и определения тренда. Исходными данными послужили временные ряды *GIMMS NDVI3g* спектрорадиометра AVHRR серии спутников NOAA (Tucker et al., 2005). Низкое пространственное (8 км) и высокое временное (1–2 раза в сутки, в зависимости от широты места съемки) разрешение позволяют охватывать обширные площади и извлекать максимум информации для анализа динамики расти-

тельного покрова. Продукт сформирован из максимальных значений NDVI за 15-дневный период, таким образом минимизируется влияние атмосферы на качество изображения. В работе использованы снимки, полученные в период вегетации растительного покрова с 1982 по 2015 г.

Для пространственного сопоставления трендов *GIMMS NDVI3g* и метеопараметров использованы данные реанализа *NCEP/NCAR* (Kalnay et al., 1996). Установление границ засушливых земель проведено по широко признанному индексу аридности, известному также как индекс влажности – отношение годового количества осадков к потенциальной эвапотранспирации (Золотокрылин, 2002). Для расчетов использован набор метеорологических данных ENVIREM с пространственным разрешением  $1 \text{ км}^2$ , усредненных за период с 1961 по 1990 г. (Title and Bemmels, 2005).

Расчет трендов осадков и *GIMMS NDVI3g* проведен для двух периодов: влажного (1982–1999 гг.) и засушливого (2000–2015 гг.). Разделение проведено именно так, поскольку в Забайкалье смена с влажной на засушливую фазу увлажненности приходится на рубеж тысячелетия (Обязов, Смахтин, 2012). При оценке изменений растительного покрова также использованы данные полевых геоботанических и дендрохронологических исследований, космоснимки сверхвысокого разрешения интернет-сервиса *Google Earth* и данные аэрофотосъемки с борта беспилотника.

**Потери лесного покрова по данным ДЗЗ.** Для оценки потери лесного покрова использована онлайн-веб-платформа *Global Forest Watch (GFW)*<sup>1</sup>, созданная в результате сотрудничества NASA, Университета Мэриленда, Google, Геологической службы США, ESRI, Vizzuality, Агентства США по международному развитию и др. (Hansen et al., 2013). Проект *GFW* в режиме почти реального времени отслеживает состояние мировых лесов с помощью спутниковой съемки. Основной компонент данного проекта – это интернет-ориентированное приложение для оценки пространственно-временной изменчивости древесного покрова земного шара за период с 2001 г. по настоящее время на основе снимков со спутников серии *Landsat* с пространственным разрешением 30 м. Потери площади лесной растительности определены как снижение ее плотности или полное исчезновение вне зависимости от причин: пожары, вырубки, ветровалы и т.д. *GFW* определяет лесную растительность как растительность высотой более 5 м вне зависимости от ее типа. Для определения факторов, влияющих на потерю лесного покрова, использован продукт *GFW Tree Cover Loss by Dominant Driver* с разрешением 10 км,

<sup>1</sup> <https://www.globalforestwatch.org> (дата обращения 10.07.2021).

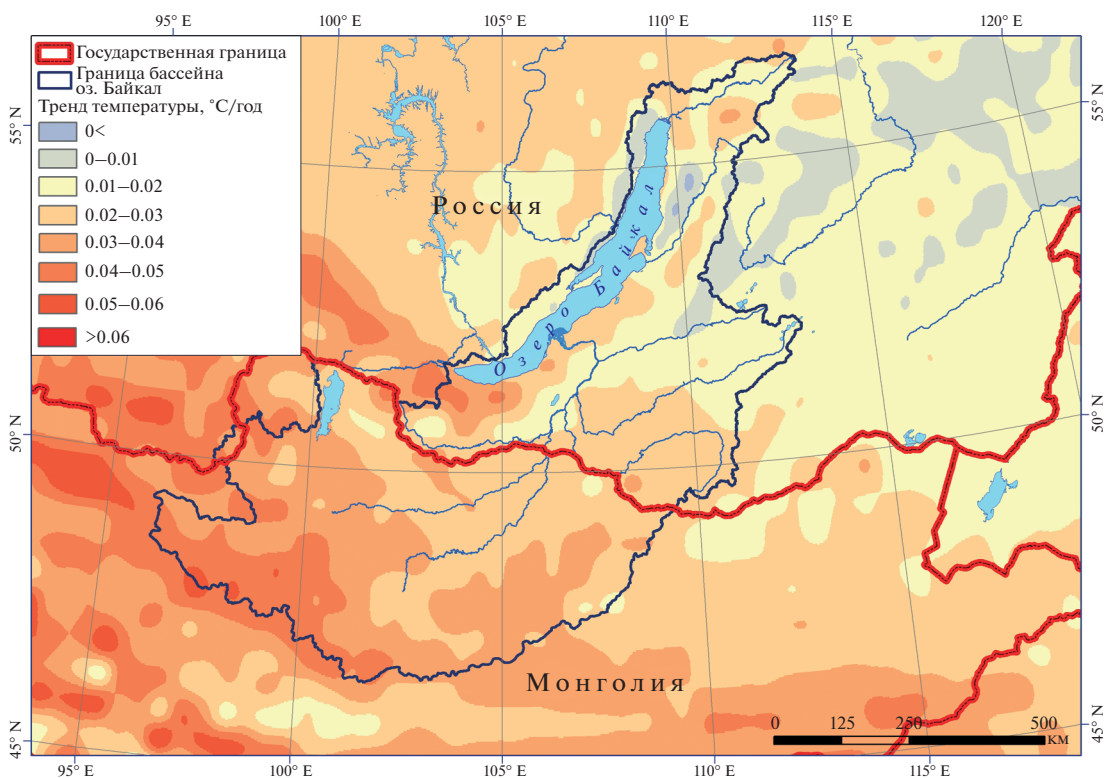


Рис. 1. Картограмма линейных трендов приземной температуры воздуха за 1982–2018 гг., °С/год.

который состоит из следующих категорий: 1) вырубка лесов — крупномасштабное обезлесение, связанное в первую очередь с увеличением площади сельскохозяйственных земель; 2) сельское хозяйство — временное уменьшение площади лесного покрова вследствие сельскохозяйственной деятельности; 3) лесное хозяйство — лесозаготовки, предполагающие незначительную степень сведения леса с последующим восстановлением; 4) лесные пожары — все лесные пожары вне зависимости от причины их возникновения за исключением сведения леса пожарами для нужд сельского хозяйства; 5) урбанизация — вырубка лесов для расширения селитебных территорий (Curtis, 2018). В регионе исследования выражены только 2 фактора: лесное хозяйство и лесные пожары.

**Оценка экосистемных услуг.** В качестве базовой методики для оценки благ и услуг, поступающих от экосистемы, выбрана методика на основе концепции общей экономической ценности (Millennium ..., 2005; Pagiola et al., 2004). В настоящее время все активнее используется новый подход “адаптации на основе экосистем”, который направлен на совершенствование управления экосистемами для обеспечения общественных выгод. Данный подход определяется как использование экосистемных услуг как части общей стратегии для того, чтобы помочь людям адапти-

роваться к негативным последствиям изменения климата (Secretariat ..., 2009). Он принимается в качестве основного подхода к адаптации лесного сектора к изменению климата.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

**Оценка долговременных изменений растительного покрова.** В результате обработки данных CRU TS 4.03 установлен статистически значимый тренд увеличения температуры воздуха и уменьшения количества осадков. Рост приземной температуры наблюдается для всей рассматриваемой территории, при этом зоны с невысокими и высокими темпами роста перемежаются как в широтном, так и в долготном направлениях (рис. 1).

Выделены два периода по режиму увлажнения: 1982–1999 гг. — влажный; 2000–2018 гг. — засушливый. Влажный период характеризуется положительными трендами суммы осадков практически для всей рассматриваемой территории, при этом наибольшие темпы роста отмечены для хр. Хамар-Дабан (14 мм/год) и района Среднего Байкала (10 мм/год) (рис. 2а). В засушливый период наблюдается отрицательная динамика количества выпавших осадков. Экстремальное снижение увлажнения отмечается для Хамар-Дабана и составляет –30 мм/год. В бассейнах рр. Верхняя Ангара и Баргузин темпы снижения достигают

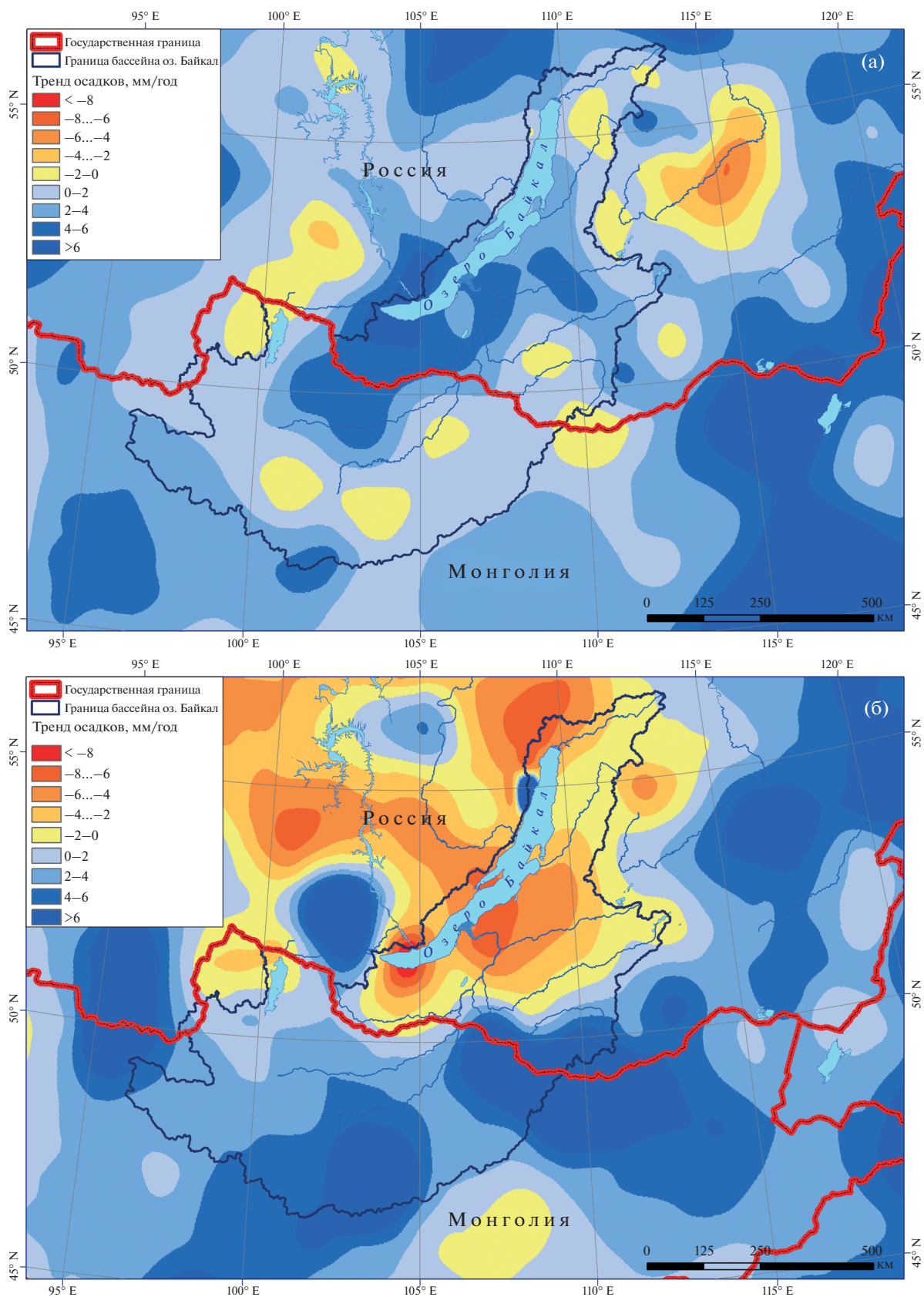


Рис. 2. Картограммы линейных трендов количества осадков (мм) за 1982–1999 гг. (а) и 2000–2018 гг. (б).

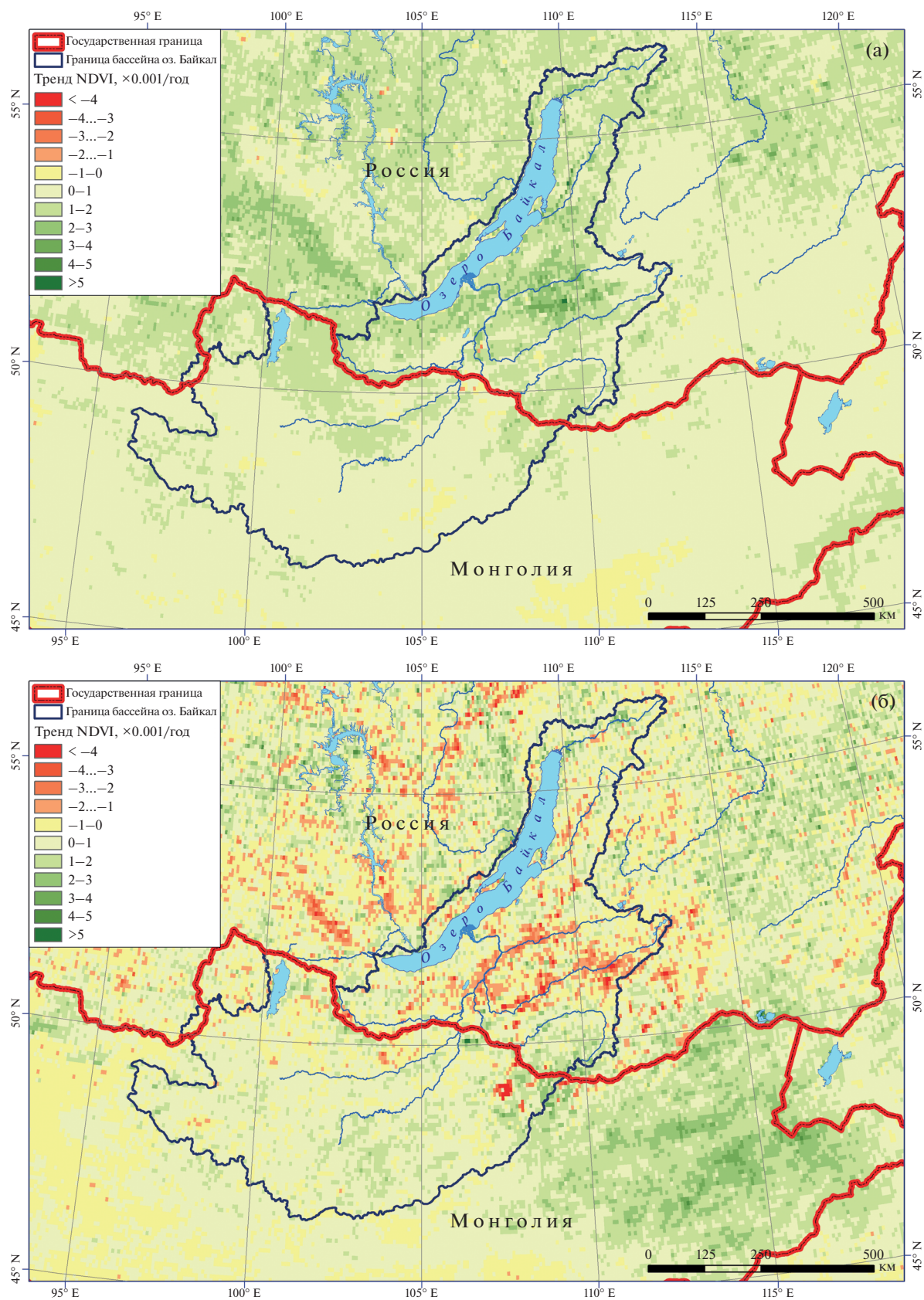


Рис. 3. Пространственное распределение линейных трендов *GIMMS NDVI3g* за 1982–1999 гг. (а) и 2000–2015 гг. (б).



**Таблица 1.** Доля положительных и отрицательных трендов *GIMMS NDVI3g* бассейна оз. Байкал, %

Период	Тренд NDVI	Семиаридная зона	Сухая субгумидная зона	Гумидная зона
Влажный (1982–1999 гг.)	Положительный	82.9	98.5	97.6
	Отрицательный	17.1	1.5	2.4
Засушливый (2000–2015 гг.)	Положительный	73.8	52.9	50.3
	Отрицательный	26.2	47.11	49.7

значений –18 мм/год (рис. 2б). Основная причина маловодья 2000–2018 гг. в бассейне Байкала – уменьшение количества осадков из-за ослабления циклонической деятельности, которое было отмечено также и в начале, и в середине этого периода (Antokhina et al., 2015).

На основе сопряженного анализа временных серий вегетационного индекса *GIMMS NDVI3g*, метеорологических рядов реанализа *NCEP/NCAR* и натурных полевых исследований проведена количественная оценка долговременных изменений растительного покрова в засушливых и гумидных зонах. В результате анализа пространственного распределения трендов *GIMMS NDVI3g* в бассейне оз. Байкал выявлено, что во влажный период, как для гумидной, так и для засушливых зон, преобладают положительные значения трендов (табл. 1, рис. 3а). В засушливый период высокие темпы роста отрицательных трендов NDVI выявлены в сухой субгумидной (31 раз) и гумидной (21 раз) зонах, что указывает на их наибольшую чувствительность к режиму увлажнения (см. табл. 1, рис. 3б).

Влажный период отмечен почти повсеместным ростом NDVI (см. рис. 3а). Менее интенсивный рост вегетационного индекса наблюдается в сухой субгумидной зоне Витимской таежно-плоскогорной провинции, где тренд осадков имеет слабоотрицательный наклон. В засушливый период сплошные зоны с отрицательным трендом NDVI характерны для семиаридных и сухих субгумидных степных ландшафтов в межгорных котловинах – это долины рр. Селенга, Верхняя Ангара, Баргузин, Уда и Джиды (см. рис. 3б). В Витимской таежно-плоскогорной провинции отрицательные тренды NDVI наблюдаются, помимо лесной растительности, в травяно-моховых болотах и вейниковых лугах. Байкальское нагорье (Северо-Байкальская таежно-нагорная провинция) с гумидным климатом также характеризуется отрицательными трендами NDVI. Уменьшение осадков, масштабные пожары (1998, 2006, 2015 гг.) усиливают тренд в негативном значении. Несмотря на слабые положительные тренды осадков в Прибайкальской гольцово-горнотаежной провинции, тренды NDVI на большей части горного массива имеют отрицательный знак. Разнонаправленность трендов NDVI и осадков в большей степени характерна для лесной расти-

тельности. Здесь влияние на динамику NDVI оказывает температура воздуха. В результате анализа пространственной корреляции рядов среднегодовых значений ГТК и NDVI выявлено, что положительная связь наблюдается для межгорных котловин, где распространены степные сообщества, а отрицательная корреляция – для лесных ландшафтов. Таким образом, осадки в большей степени влияют на NDVI степной растительности, а температура воздуха – на NDVI лесной (Garmaev et al., 2020).

Воздействие же лесных пожаров на ландшафты более значительно и часто сопровождается каскадным эффектом. Лесные массивы, подвергшиеся пожарам до 2000-х годов, характеризуются положительными значениями трендов, обусловленных постпирогенными восстановительными сукцессиями на поздних стадиях. Пожары, прошедшие с 2000 г. по настоящее время, как правило, дают отрицательные значения трендов, поскольку на данных территориях распространены ранние стадии вторичных сукцессий (бурьяны, закустаривание). Характерной особенностью пространственного распределения трендов NDVI являются их максимальные и минимальные значения на участках с восстановлением и вырубкой леса соответственно.

**Потери площади лесного покрова Республики Бурятия.** Количество и площади лесных пожаров в Бурятии подвержены резким колебаниям по годам (по данным Республиканского агентства лесного хозяйства с 1936 г.). В условиях экстремальной погоды (высокая температура воздуха, отсутствие осадков) лесные пожары распространяются бесконтрольно и переходят в разряд крупных, когда дуют сильные, штормовые ветры. В такие годы лесные пожары приобретают катастрофический характер (1943–1944, 1953–1954, 1996, 2003, 2008–2009, 2014–2015 гг.). В начале рассматриваемого периода прослеживается цикл крупных пожаров раз в 10 лет; дальнейшая их динамика показывает, что периоды катастрофических пожаров сокращаются и составляют 5–6 лет (рис. 4). Отметим практически полное отсутствие лесных пожаров в годы устойчивого развития СССР (период между 1955 и 1990 гг.), характеризовавшихся надежной системой охраны лесов. В 2015 г. произошли самые масштабные пожары как по коли-

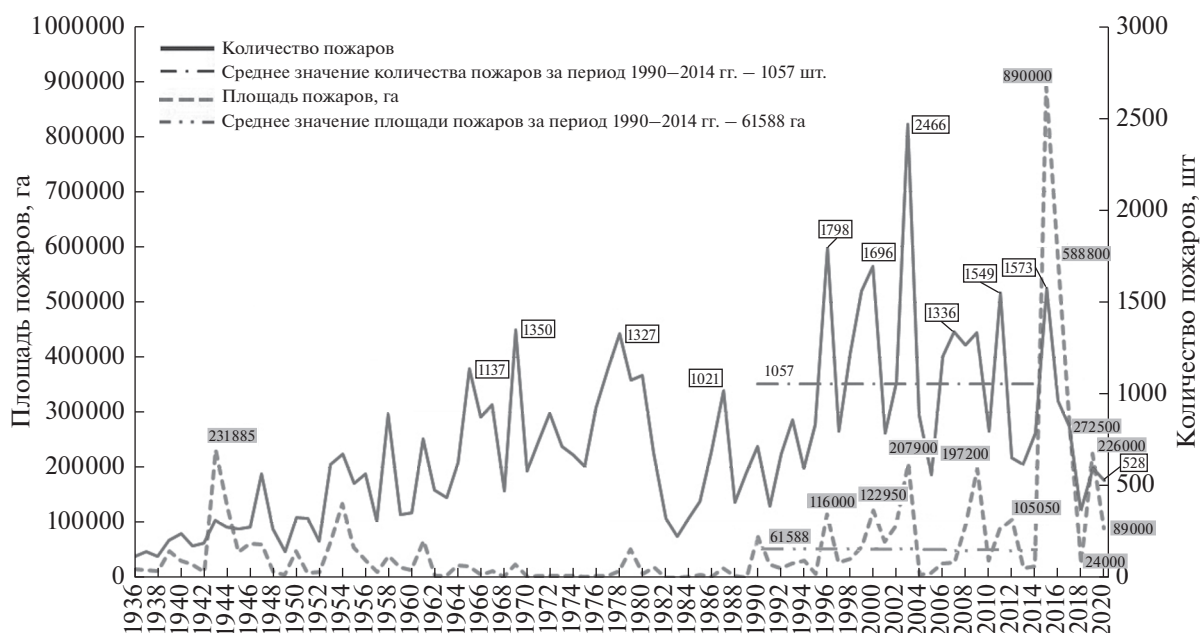


Рис. 4. Динамика лесных пожаров на землях Гослесфонда Республики Бурятия с 1936 по 2020 г.: количество пожаров и лесная площадь.

честву (1573 ед.), так и по площади (890 тыс. га) сгоревших лесов за весь период наблюдения.

В табл. 2 представлены оценки потери леса в районах Республики Бурятия с 2001 по 2019 г. по данным *GFW*; значения сгруппированы по пятилетиям (кроме последнего периода). Наибольшая доля обезлесения в первом пятилетии наблюдалась в Баунтовском, Прибайкальском и Хоринском районах, далее следуют Еравнинский, Кижингинский и Северо-Байкальский районы. За рассматриваемый период 73% лесных потерь в республике наблюдаются в этих северных и восточных районах. Следующее пятилетие характеризовалось практически двукратным снижением потери леса по сравнению с 2001–2005 гг. В данный период наибольшие потери вновь наблюдались в северных районах (Баунтовском и Северо-Байкальском), а также в Прибайкальском и Бичурском. Пятилетие с 2011 по 2015 г. практически совпадает с предыдущим по площади и структуре обезлесения – наибольшие потери в Баунтовском, Северо-Байкальском и Прибайкальском. Последний период 2016–2019 гг. характеризуется четырехкратным ростом площади обезлесенных территорий. Как и прежде, север Бурятии (Баунтовский, Баргузинский, Курумканский, Муйский, Северо-Байкальский районы), а также Прибайкальский и Хоринский районы вносят наибольший вклад в общую потерю леса в республике – 90%.

Преобладающее воздействие на лесные земли в северных районах Бурятии оказывают лесные пожары. Труднодоступные горные массивы явля-

ются препятствием для эффективного тушения пожаров. Следует отметить, что даже охранный статус ООПТ, расположенных в Баргузинском, Курумканском и Северо-Байкальском районах, не смог предотвратить и эффективно противостоять катастрофическим пожарам. Еравнинский и Хоринский районы, где наблюдались большие потери леса, также подвержены пожарам. В Кабанском, Прибайкальском районах и в районах Селенгинского среднегорья потери леса обусловлены хозяйственной деятельностью, однако пожарный фактор также значим. Западные районы Бурятии (Окинский, Тункинский, Закаменский) также подвержены пожарам, однако имеют существенно меньшие потери леса.

В результате анализа данных метеорологических станций выявлено, что погодные условия 2003–2004, 2015–2017 гг. способствовали высокой горимости лесов. Так, осадки, усредненные по метеостанциям северных районов, были существенно ниже нормы: весной аномалия  $P_{2003} = -34.5$  мм и  $P_{2015} = -14.9$  мм (при норме 44.6 мм), в летний период 2004, 2015, 2016 и 2017 г. аномалии осадков составили  $-86.6$ ,  $-120$ ,  $-76.8$ ,  $-82$  мм соответственно (при норме  $-226$  мм). Наибольшие аномалии  $T$  в северных районах проявились в летние месяцы 2015–2017 гг. и составили 2.2, 1.8 и 1.8°C соответственно (при норме 13.4°C). Комплексный показатель влагообеспеченности ГТК (учитывающий и температуру, и осадки) показал наименьшие значения в 2004, 2015 и 2017 г.: 0.88, 0.67 и 0.87 соответственно. ГТК по метеостанциям Тунка и Цакир западной части республики, ха-

**Таблица 2.** Потери площади лесов Республики Бурятия по данным *GFW*, тыс. га

Район	2001–2005 гг.	2006–2010 гг.	2011–2015 гг.	2016–2019 гг.	Всего за 2001–2019 гг.
Баргузинский	34.0	18.4	7.2	102.1	161.7
Баунтовский	172.2	39.1	72.3	468.5	752.1
Бичурский	5.1	42.5	2.2	5.5	55.3
Джидинский	13.1	10.0	3.9	0.9	27.9
Еравнинский	43.2	13.6	41.0	17.0	114.8
Заиграевский	22.6	17.2	10.9	14.3	65.0
Закаменский	4.5	13.1	8.2	1.2	27.0
Иволгинский	3.8	5.0	1.4	4.1	14.3
Кабанский	9.2	3.7	4.3	22.9	40.1
Кижингинский	45.5	12.2	17.8	10.5	86.0
Курумканский	26.2	6.7	22.0	90.5	145.4
Кяхтинский	0.3	2.4	0.9	0.9	4.5
Муйский	21.4	17.6	16.0	63.4	118.4
Мухоршибирский	2.0	7.9	2.6	2.9	15.4
Окинский	5.9	3.3	2.8	18.2	30.2
Прибайкальский	80.3	30.6	42.4	180.0	333.3
Северо-Байкальский	44.7	40.4	42.5	141.3	268.9
Селенгинский	14.8	8.7	2.5	5.0	31.0
Тарбагатайский	3.7	6.3	2.3	2.5	14.8
Тункинский	3.6	7.1	2.4	5.1	18.2
Хоринский	71.0	27.3	17.7	72.7	188.7
Республика Бурятия	627.2	333.5	336.0	1234.3	2531.0

рактирующей наименьшими потерями лесного покрова, принимал значения больше 1, что соответствует обеспеченному увлажнению.

Следует отметить, что восстановление лесов после крупных пожаров происходит достаточно медленно, а в некоторых случаях и вовсе не наблюдается. В результате анализа космических снимков высокого пространственного разрешения установлено, что в течение 3–5 лет после крупного пожара гари хорошо дешифрируются как визуальными, так и автоматизированными методами. Отдельные поврежденные пожарами участки леса, расположенные в потенциально пожароопасных местах (возле автодорог, населенных пунктов и т.д.), подвергаются повторному выгоранию после появления молодой поросли лиственных пород деревьев и кустарников. Кроме того, после уничтожения больших площадей леса пожарами проводится сплошная санитарная рубка горелого леса, но процессов лесовосстановления на выгоревших территориях не наблюдается. На месте уничтоженного огнем и добычей древесины леса активно развиваются эрозионные и дефляционные процессы, происходит остепнение. Тем самым, пирогенный фактор приводит не только к потере лесопокрытых площадей, но также и к трансформации ландшафтов.

**Экосистемные услуги леса.** Потери лесного покрова на исследуемой территории вследствие потепления климата влекут за собой и изменение объемов экосистемных услуг лесных земель, которое входит в завершающее звено (наряду с мерами по адаптации лесопользования к изменению климата) алгоритма проведенного исследования. Детальные экономические оценки и тенденции экосистемных услуг леса российской части бассейна р. Селенги на муниципальном уровне в связи с изменением климата приведены в табл. 3.

Для оценки экосистемных услуг леса использованы подходы международного проекта “Оценка экосистем на пороге тысячелетий” (Millennium ..., 2005). При определении ценности экосистемных услуг в стоимостном выражении в каждом отдельном случае использовался наиболее целесообразный из ряда имеющихся методов (см. табл. 3).

Проведенные расчеты показывают реальную возможность получения значительных доходов от использования лесной экосистемы бассейна р. Селенги. Надо отметить, что полученные оценки не могут быть суммированы, так как при расчете обеспечивающих услуг использовались фактические или планируемые к использованию в ближайшем будущем данные регулирующих и поддерживающих услуг – данные в целом по лес-

**Таблица 3.** Экономические оценки и тенденции изменения спроса и монетизации экосистемных услуг леса российской части бассейна р. Селенги в связи с изменением климата (в текущих ценах, эквивалентно доллару США)

Экосистемная услуга	Предоставление услуги из-за изменения климата	Спрос на услугу из-за изменения климата	Ценность потока ( <i>flow</i> ) услуг за год, млн долл. США	Ценность лесного капитала ( <i>stock</i> ), млн долл. США	%
Обеспечение древесиной и дровами	+/-	+/-	20.6	1030.3	9.4
Обеспечение продуктами леса	—	+	7.3	363.05	3.3
Обеспечение продуктами охоты	—	+	2.3	114.0	1.0
Депонирование углерода	+/-	+	78.3	3913.1	35.7
Фильтрационные функции болотных угодий	—	+	29.4	1471.25	13.4
Водорегулирующая функция лесной экосистемы	—	+	52.1	2605.6	23.8
Культурно-рекреационные услуги	+/-	+/-	24.3	1217.4	11.1
Сохранение естественных условий для биоразнообразия	—	+	4.8	238.6	2.2

*Примечание:* “—” — снижение предоставления экосистемной услуги из-за изменения климата; “+” — повышение спроса на услугу из-за изменения климата; “+/-” — без изменений.

ному фонду бассейна р. Селенги. Следовательно, необходим расчет коэффициентов (весов). Тем не менее расчеты наглядно показывают, что ценность экосистемных услуг этих лесов сопоставима с валовым продуктом данной территории.

Планы экономического развития региона и уровень цен на природные ресурсы позволяют говорить, что ценность экосистемных услуг будет постоянно расти, а их роль в процессах адаптации к изменению климата — увеличиваться.

Ситуация со значительными пожарами в 2015 г. связана, наряду с другими факторами, и с глобальным изменением климата, которое влияет на рост числа опасных гидрометеорологических явлений, включая периоды жаркой и засушливой погоды, создающей условия для катастрофических пожаров. Относительно катастрофических пожаров лета 2003, 2009 и 2015 гг. (периодичность — 6 лет) можно сказать, что причинами установления высокого уровня горимости лесов явилось наложение двух факторов: экстремальные погодные условия (отсутствие осадков и аномальная жара) и понижение уровня водных объектов бассейна оз. Байкал (как следствие этого — низкие запасы влаги в почве); в результате — ускоренное высыхание почвенного покрова и увеличение массы сухих горючих материалов в лесу.

Лесные пожары “запрограммированы” природой как элемент эволюции лесной экосистемы, но при чрезмерном их возникновении и распространении в условиях экстремальной погоды и неблагоприятного распределения лесного фонда по классам природной пожарной опасности, накопления “сухих” горючих материалов в лесу,

природа сама становится жертвой, неся огромные потери. Помимо этого, такие пожары представляют угрозу населению и населенным пунктам, хозяйственным объектам.

При благоприятных условиях лесные пожары должны способствовать замещению одних типов растительности другими, более приспособленными к новому климату.

Тем не менее, пожары, распространение вредителей и другие негативные воздействия климатических изменений могут нанести ощутимый урон лесному сектору экономики с точки зрения обеспечения древесиной и дровами (табл. 4).

**Разработка стратегии.** Каким образом можно адаптировать управление лесами и лесопользованием, чтобы для лесов, во-первых, снижался негативный эффект от изменений климата и, во-вторых, они были устойчивее к климатическим изменениям? Речь идет о том, что планирование лесохозяйственной и лесопромышленной деятельности следует осуществлять с учетом текущей и будущей климатической ситуации. Предлагается следующий набор мероприятий, способствующих усилению поглощения и удержания углерода лесами и адаптации управления лесами и лесопользованием к изменению климата (табл. 5).

Перечисленные мероприятия нельзя назвать принципиально новыми — они вполне укладываются в российскую систему управления лесным хозяйством и лесопользованием. Новыми можно назвать меры, направленные на улучшение структуры и пород деревьев, устойчивых к изменению климата, лесным пожарам, увеличению биомассы и поглощению углерода, а также разви-

**Таблица 4.** Последствия изменения климата в бассейне р. Селенги для экосистемной услуги по обеспечению населения древесиной и дровами

Угрозы, связанные с изменением климата	Наблюдаемое и потенциальное воздействие
Первичные климатические угрозы	
Засухи, тепловые волны	Возникновение пожароопасных условий летом, распространение пожаров
Сильные ливни, снегопады, бури, ураганы, а также весенние оттепели, бесснежные зимы	Повреждение и гибель деревьев, накопление легковоспламеняющегося валежника и бурелома
Долгосрочное повышение температуры	Изменение состава растительных комплексов
Опосредованные климатические угрозы	
Наводнения, оползни, лавины и сели	Затруднение доступа к лесосекам
Распространение болезней и вредителей	Повреждение и гибель деревьев, накопление легковоспламеняющегося валежника и бурелома
Распространение чужеродных видов растений	Изменение состава растительных комплексов

**Таблица 5.** Комплекс мер, способствующих усилению поглощения углерода лесами и адаптации управления лесами и лесопользованием к изменению климата в регионе

Комплекс мер	Мероприятия
Совершенствование управления лесами с целью сдерживания потепления климата	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Сохранение старовозрастных (малонарушенных) лесов, расширение площади лесных ООПТ</li> <li>2. Усиление деятельности по лесовосстановлению на вырубках и гарях, обеспечивающее формирование продуктивных насаждений для увеличения биомассы и поглощения углерода, использование климатически- и пожароустойчивых древесных пород и сортов</li> <li>3. Лесовосстановление на безлесных территориях, в том числе на выведенных из оборота сельскохозяйственных землях, создание противоэрозионных и полезащитных лесных насаждений в малолесных районах</li> <li>4. При проведении инвентаризации лесов, формировании лесного реестра, составлении лесных планов — проведение оценки степени климатической устойчивости лесных насаждений</li> <li>5. Усиление профилактики и борьбы с лесными пожарами, вредителями и болезнями леса</li> </ol>
Совершенствование управления эксплуатационной частью лесного фонда	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Внедрение технологий рубок для предотвращения потерь углерода подстилкой и почвой</li> <li>2. Переход от сплошных рубок к выборочным</li> <li>3. Более полная утилизация заготавливаемой древесины, в том числе использование ветвей и прочих порубочных остатков для производства биотоплива</li> <li>4. Развитие добровольной лесной сертификации по системе FSC (<i>Forest Stewardship Council</i> — Лесной попечительский совет)</li> </ol>

тие добровольной лесной сертификации по системе FSC.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В Бурятии наблюдаются значительные трансформации природной среды. Установлены статистически значимые тренды роста температуры воздуха и уменьшения количества осадков, с идентификацией влажного и засушливого периодов. Во влажный период положительные тренды NDVI наблюдались почти для всей территории исследования, тогда как засушливый период характеризуется значительным ростом отрицательных трендов вегетационного индекса. Динамика NDVI степной растительности в большей степени

зависит от осадков, динамика NDVI лесов — от температуры воздуха. Лесовосстановление, постпирогенная сукцессия, закустаривание залежей и др. обуславливают рост NDVI. Отрицательные тренды NDVI характерны для остепненных экосистем в условиях снижения количества осадков и для лесной растительности, подверженной вырубкам и пожарам.

В результате исследования выявлено, что наибольшие потери лесного покрова Бурятии за последние 20 лет произошли в северных районах республики и наблюдались в 2003—2004, 2015—2017 гг. Основной причиной потерь являются лесные пожары, которым способствовали весенние и летние засухи. В центральной части республики, помимо лесных пожаров, потери обусловле-

ны коммерческой деятельностью по заготовке леса. Западные влагообеспеченные районы меньше подвержены пожарам и, как следствие, в них наблюдаются меньшие потери лесного покрова и его экосистемных услуг.

Таким образом, наше исследование показывает, что преобладающее влияние на экосистемные услуги леса на рассматриваемой территории оказывают лесные пожары, на частоту и площадь которых влияет изменение климата, а также антропогенные факторы. Основными инструментами адаптации лесных земель к изменению климата являются совершенствование управления лесами с целью сдерживания потепления климата, а также совершенствование управления эксплуатационной частью лесного фонда.

### ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при финансовой поддержке проектов НИР № АААА-А19-119060390027-8 и АААА-А21-121011990023-1 Байкальского института природопользования СО РАН.

### FUNDING

This work was carried out with the financial support of R&D projects nos. АААА-А19-119060390027-8 and АААА-А21-121011990023-1 of the Baikal Institute of Nature Management, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Андреев С.Г., Гармаев Е.Ж., Аюржанаев А.А., Батоцыренов Э.А., Гуржапов Б.О.* Реконструкция водности рек и исторические хроники экстремальных природных явлений Байкальской Азии // Научное обозрение. 2016. № 5. С. 35–38.
- Барталев С.А., Егоров В.А., Ефремов В.Ю., Лупян Е.А., Стыценко Ф.В., Флитман Е.В.* Оценка площади пожаров на основе комплексирования спутниковых данных различного пространственного разрешения MODIS и Landsat-TM/ETM+ // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 2. С. 9–26.
- Барталев С.А., Егоров В.А., Крылов А.М., Стыценко Ф.В., Ховратович Т.С.* Исследование возможностей оценки состояния поврежденных пожарами лесов по данным многоспектральных спутниковых измерений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7. № 3. С. 215–225.
- Барталев С.А., Лупян Е.А., Стыценко Ф.В., Панова О.Ю., Ефремов В.Ю.* Экспресс-картографирование повреждений лесов России пожарами по спутниковым данным Landsat // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 1. С. 9–20.
- Бобылев С.Н., Минаков В.С., Соловьева С.В., Третьяков В.В.* Эколого-экономический индекс регионов РФ. Методика и показатели для расчета. WWF России, РИА Новости, 2012. 150 с.
- Борисова Т.А.* Лесные пожары в Бурятии: причины и следствия // Вестн. Воронежского гос. ун-та. Сер.: География, геоэкология. 2017. № 2. С. 78–84.
- Булыгина О.Н., Разуваев В.Н., Коршунова Н.Н., Швец Н.В.* Описание массива данных месячных сумм осадков на станциях России // Патент РФ на базу данных № 2015620394. Патентообладатель ФГБУ “Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных”. 2015. Бюл. № 3 (101).
- Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М.: Росгидромет, 2014. 1009 с.
- Гармаев Е.Ж., Цыдыпов Б.З., Дабаева Д.Б., Андреев С.Г., Аюржанаев А.А., Куликов А.И.* Уровенный режим озера Байкал: ретроспектива и современное состояние // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2017. № 2. С. 4–18.
- Государственный доклад “О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2017 году”. М.: Минприроды России; НПП “Кадастр”, 2018. 888 с.
- Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2018 год. М., 2019. 79 с.
- Доржиев Ц.З., Бао Юухай, Бадмаева Е.Н., Ванчиндорж Батсайхан, Урбазаев Ч.Б., Юшань.* Лесные пожары в Республике Бурятия за 2001–2016 гг. // Природа Внутренней Азии. 2017. № 3 (4). С. 22–25.
- Евдокименко М.Д., Иванов В.В.* Особенности противопожарного обустройства в лесах Прибайкалья // Сиб. лесн. журн. 2017. № 5. С. 63–75. <https://doi.org/10.15372/SJFS20170506>
- Золотокрылин А.Н.* Индикатор аридности климата // Аридные экосистемы. 2002. Т. 8. № 16. С. 47–69.
- Кокорин А.О.* Изменение климата: обзор Пятого оценочного доклада МГЭИК. М.: Всемирный фонд дикой природы (WWF), 2014. 80 с.
- Медведева М.А., Савин И.Ю., Барталев С.А., Лупян Е.А.* Использование данных NOAA AVHRR для выявления многолетней динамики растительности Северной Евразии // Исслед. Земли из космоса. 2011. № 4. С. 55–62.
- Обязов В.А.* Региональный отклик приземной температуры воздуха на глобальные изменения (на примере Забайкалья) // ДАН. 2015. Т. 461. № 4. С. 459–462.
- Обязов В.А., Смахтин В.К.* Многолетний режим стока рек Забайкалья: анализ и фоновый прогноз // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2012. № 1. С. 63–72.
- Сидоров А.А., Санжиева С.Е.* Хронология лесных пожаров в Республике Бурятия // Вестн. КрасГАУ. 2018. № 4 (139). С. 204–208.
- Содномов Б.В., Аюржанаев А.А., Цыдыпов Б.З., Гармаев Е.Ж.* Алгоритм оценки долговременных вариаций MODIS NDVI // Журн. СФУ. Техника и технологии. 2018. Т. 11. № 1. С. 61–68.
- Содномов Б.В., Аюржанаев А.А., Черных В.В., Жарникова М.А.* Потери лесного покрова Республики Бурятия в XXI веке // Успехи современного естествознания. 2020. № 10. С. 44–49.
- Ставников Д.Ю.* Анализ санитарного и лесопатологического состояния лесов Республики Бурятия // Вестн.

- Бурятской гос. сельскохозяйств. акад. им. В.П. Филиппова. 2013. № 2. С. 67–73.
- Стыцэнко Ф.В., Барталев С.А., Егоров В.А., Лунян Е.А. Метод оценки степени повреждения лесов пожарами на основе спутниковых данных MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 1. С. 254–266.
- Тишков А.А. Биосферные функции и экосистемные услуги ландшафтов степной зоны России // Аридные экосистемы. 2010. Т. 10. № 1. С. 5–15.
- Черных В.Н., Бондаренко Д.В., Аюшеева Д.М., Раднаева Б.Б. Добыча кедрового ореха как фактор деградации кедровников горно-таежных ландшафтов Забайкалья (на примере тайги хребта Цаган-Дабан) // Вестн. Бурятского гос. ун-та. Биология, география. 2019. № 3. С. 44–51.
- Шуфан Я., Плотнокова Г.П., Симонян С.Н. Перспективное развитие лесопереработки сибирского округа: взаимодействие Китая и России // Системы. Методы. Технологии. 2018. № 3 (39). С. 116–124.
- Экосистемные услуги России: Прототип национального доклада. Т. 1. Услуги наземных экосистем. М.: Изд-во Центра охраны дикой природы, 2016. 148 с.
- Экосистемные услуги России: Прототип национального доклада. Т. 2. Биоразнообразие и экосистемные услуги: принципы учета в России. М.: Изд-во Центра охраны дикой природы, 2020. 252 с.
- Antokhina O.Yu., Antokhin P.N., Kocheikova O.S., Mordvinov V.I. Summer circulation of the Northern Hemisphere atmosphere in periods of strong and weak East Asian monsoon // Atmosph. and Ocean. Optics. 2015. Vol. 28. № 3. P. 258–264.
- Curtis P.G., Slay C.M., Harris N.L., Tyukavina A., Hansen M.C. Classifying Drivers of Global Forest Loss // Sci. 2018. Vol. 361. Iss. 6407. P. 1108–1111.
- Dabaeva D.B., Tsydyпов B.Z., Ayurzhanayev A.A., Andreev S.G., Garmayev Y.Zh. Peculiarities of Lake Baikal water level regime // IOP Conf. Series: Earth and Environ. Sci. 2016. Vol. 48. Iss. 012014.
- Escuin S., Navarro R., Fernandez P. Fire severity assessment by using NBR (Normalized Burn Ratio) and NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) derived from Landsat TM/ETM images // Int. J. Rem. Sens. 2008. № 29. P. 1053–1073.
- Garmayev E.Zh., Ayurzhanayev A.A., Tsydyпов B.Z., Alymbaeva Zh.B., Sodnomov B.V., Andreev S.G., Zharnikova M.A., Batomunkuev V.S., Mandakh N., Salikhov T.K., Tulokhonov A.K. Assessment of the spatial and temporal variability of arid ecosystems in the Republic of Buryatia // Arid Ecosys. 2020. Vol. 10. № 2. P. 114–122.
- Global Forest Resources Assessment. Desk Reference. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2015.
- Hansen M.C., Potapov P.V., Moore R., et al. High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change // Sci. 2013. Vol. 342. Iss. 6160. P. 850–853.
- Harris I., Jones P.D., Osborn T.J., Lister D.H. Updated high-resolution grids of monthly climatic observations – the CRU TS3.10 Dataset // Int. J. Climatol. 2014. № 34. P. 623–642.
- Kalnay et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project // Bull. Amer. Meteor. Soc. 1996. Vol. 77. P. 437–470.
- Kasischke E.S., Turetsky M.R., Ottmar R.D., French N.H.F., Hoy E.E., Kane E.S. Evaluation of the composite burn index for assessing fire severity in Alaskan black spruce forests // Int. J. Wildland Fire. 2008. Vol. 17. P. 515–526.
- Keenan R.J., Reams G.A., Achard F., Freitas J.V., Grainger A., Lindquist E. Dynamics of global forest area: Results from the FAO Global Forest Resources Assessment // Forest Ecol. and Management. 2015. Vol. 352. P. 9–20.
- Loboda T., O'Neal K.J., Csiszar I. Regionally adaptable dNBR-based algorithm for burned area mapping from MODIS data // Remote Sens. of the Environ. 2007. Vol. 109 (4). P. 429–442.
- Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystems and Human Well-being. Synthesis Report. Washington D.C.: Island Press, 2005. 160 p.
- Pagiola S., von Ritter K., Bishop J. How Much is an Ecosystem Worth? Assessing the Economic Value of Conservation. The World Bank, Washington D.C., 2004.
- Schepaschenko D.G., Shvidenko A.Z., Lesiv M.Y., Kraxner F., Ontikov P.V., Shchepashchenko M.V. Estimation of forest area and its dynamics in Russia based on synthesis of remote sensing products // Contemporary Problems of Ecol. 2015. Vol. 8. № 7. P. 811–817.
- Secretariat of the Convention on Biological Diversity. Connecting Biodiversity and Climate Change Mitigation and Adaptation: Report of the Second Ad Hoc Technical Expert Group on Biodiversity and Climate Change. Montreal, 2009. Technical Series № 41. 126 p.
- Title P.O., Bemmels J.B. ENVIREM: an expanded set of bioclimatic and topographic variables increases flexibility and improves performance of ecological niche modeling // Ecography. 2018. Vol. 41. P. 291–307.
- Tucker C.J., Pinzon J.E., Brown M.E., Slayback D.A., Pak E.W., Mahoney R., Vermote E.F., El Saleous N. An extended AVHRR 8-km NDVI dataset compatible with MODIS and SPOT vegetation NDVI data // Int. J. Remote Sens. 2005. Vol. 26. P. 4485–4498.

## Impact of Climate Change on Ecosystem Services of Forest Lands in the Southern Part of Eastern Siberia

B. Z. Tsydyпов<sup>1, \*</sup>, E. Zh. Garmayev<sup>1</sup>, B. O. Gomboev<sup>1</sup>, A. A. Ayurzhanayev<sup>1</sup>, B. V. Sodnomov<sup>1</sup>, S. D. Puntsukova<sup>1</sup>, S. G. Andreev<sup>1</sup>, and M. A. Motoshkina<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Baikal Institute of Nature Management, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Ulan-Ude, Russia

\*e-mail: bz61@binm.ru

The features of the transformation of individual components of the natural environment in the south of Eastern Siberia (Republic of Buryatia was analyzed in detail) under the conditions of climate change, which have a critical impact on the ecosystem services of forest lands, have been determined. A system of sequential and

complementary methods has been applied, which allows an objective analysis of this impact and its assessment: remote sensing methods, correlation analysis, cartographic method, methods of the concept of total economic value, and “ecosystem-based adaptation.” The air temperature, precipitation, and NDVI trends were calculated for the wet (1982–1999) and dry (2000–2018) periods. Temperature rise, as the most critical parameter of the state of forest lands, is observed for the entire study area; at the same time, zones with low growth rates of surface temperature are interspersed with zones with high growth rates, both in latitudinal and longitudinal directions. The wet period is characterized by positive trends in the amount of precipitation for almost the entire study area. During the dry period, negative dynamics of the amount of precipitation is observed for the predominant part of this territory. The wet season is marked by an almost universal rise in NDVI. During the dry season, forest vegetation is characterized by multidirectional trends in NDVI and precipitation; here the NDVI dynamics is influenced by temperature. These patterns also predetermine changes in the development of ecosystem services of forest lands in the area under consideration. It has been determined that climate change has a negative impact on the predominant part of the ecosystem services of forest lands. The greatest negative impact on these services over a long period of observation (1936–2015) was caused by forest fires, which by the end of this period had significantly increased both in number and in area. A set of measures is considered to facilitate adaptation of forest land management to climate change.

*Keywords:* climate change, NDVI, trends, ecosystem services, forest fires, adaptation, forest lands in the south of Eastern Siberia

## REFERENCES

- Andreev S.G., Garmaev E.Zh., Ayurzhanayev A.A., Batotsyrenov E.A., Gurzhapov B.O. Reconstruction of the water content of rivers and the historical chronicles of extreme natural phenomena of Baikal Asia. *Nauchn. Obozrenie*, 2016, no. 5, pp. 35–38. (In Russ.).
- Antokhina O.Yu., Antokhin P.N., Kochetkova O.S., Mordvinov V.I. Summer circulation of the Northern Hemisphere atmosphere in periods of strong and weak East Asian monsoon. *Atmos. Ocean. Opt.*, 2015, vol. 28, no. 3, pp. 258–264. <https://doi.org/10.1134/S1024856015030021>
- Bartalev S.A., Egorov V.A., Efremov V.Yu., Loupian E.A., Stytsenko F.V., Flitman E.V. Estimation of the area of fires based on the integration of satellite data of different spatial resolution MODIS and Landsat-TM / ETM+. *Sovr. Probl. DZZ Kosm.*, 2012, vol. 9, no. 2, pp. 9–26. (In Russ.).
- Bartalev S.A., Egorov V.A., Krylov A.M., Stytsenko F.V., Khovratovich T.S. Investigation of the possibilities of assessing the state of forest damaged by fires according to multispectral satellite measurements. *Sovr. Probl. DZZ Kosm.*, 2010, vol. 7, no. 3, pp. 215–225. (In Russ.).
- Bartalev S.A., Loupian E.A., Stytsenko F.V., Panova O.Yu., Efremov V.Yu. Express mapping of forest fire damage in Russia using Landsat satellite data. *Sovr. Probl. DZZ Kosm.*, 2014, vol. 11, no. 1, pp. 9–20. (In Russ.).
- Bobylev S.N., Minakov V.S., Solov'eva S.V., Tretyakov V.V. *Ekologo-ekonomicheskii indeks regionov RF. Metodika i pokazateli dlya rascheta* [Ecological and Economic Index of the Regions of the Russian Federation. Methodology and Indicators for the Calculation]. WWF Rossii, RIA Novosti, 2012. 150 p.
- Borisova T.A. Forest fires in the Republic of Buryatia: causes and consequences. *Vestn. VGU. Ser. Geogr., Geoekol.*, 2017, no. 2, pp. 78–84. (In Russ.).
- Bulygina O.N., Razuvaev V.N., Korshunova N.N., Shvets N.V. Description of the data array of monthly precipitation amounts at Russian stations. Patent of the Russian Federation for the Database no. 2015620394. Patent holder: All-Russian Research Institute of Hydrometeorological Information – World Data Center. 2015. (In Russ.).
- Chernykh V.N., Bondarenko D.V., Ayusheeva D.M., Radnaeva B.B. Pine nut harvesting as a factor of degradation of cedar forests in mountain-taiga landscapes of Transbaikalia (on example of the taiga ridge Tsagan-Daban). *Vestn. Buryatskogo Gos. Univ. Biol., Geogr.*, 2019, no. 3, pp. 44–51. (In Russ.).
- Connecting Biodiversity and Climate Change Mitigation and Adaptation: Report of the Second Ad Hoc Technical Expert Group on Biodiversity and Climate Change*. CBD Technical Series no. 41. Montreal: Secretariat of the Convention on Biological Diversity, 2009. 126 p.
- Curtis P.G., Slay C.M., Harris N.L., Tyukavina A., Hansen M.C. Classifying drivers of global forest loss. *Science*, 2018, vol. 361, no. 6407, pp. 1108–1111. <https://doi.org/10.1126/science.aau3445>
- Dabaeva D.B., Tsydygov B.Z., Ayurzhanayev A.A., Andreev S.G., Garmaev E.Zh. Peculiarities of Lake Baikal water level regime. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, 2016, vol. 48, 012014. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/48/1/012014>
- Doklad ob osobennostyakh klimata na territorii Rossiiskoi Federatsii za 2018 god* [A Report on Climate Features on the Territory of the Russian Federation in 2018]. Moscow: Rosgidromet, 2019. 79 p.
- Dorzhiiev Ts.Z., Bao Y., Badmaeva E.N., Batsaihan V., Urbazaev Ch.B., Yushan Y. Forest fires in Republic of Buryatia for 2002–2016. *Priroda Vnutrennei Azii*, 2017, no. 3(4), pp. 22–37. (In Russ.).
- Ekosistemnye uslugi Rossii: Prototip natsional'nogo doklada* [Ecosystem Services of Russia: Prototype of the National Report]. Vol. 1: *Uslugi nazemnykh ekosistem* [Services of Terrestrial Ecosystems]. Moscow: Tsentr Okhrany Dikoi Prirody, 2016. 148 p.
- Ekosistemnye uslugi Rossii: Prototip natsional'nogo doklada* [Ecosystem Services of Russia: Prototype of the National Report]. Vol. 2: *Bioraznoobrazie i ekosistemnye uslugi: printsipy ucheta v Rossii* [Biodiversity and Ecosystem Services: Accounting Principles in Russia]. Moscow: Tsentr Okhrany Dikoi Prirody, 2020. 252 p.
- Escuin S., Navarro R., Fernandez P. Fire severity assessment by using NBR (Normalized Burn Ratio) and NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) derived from Landsat TM/ETM images. *Int. J. Remote Sens.*, 2008, vol. 29, no. 4, pp. 1053–1073.



- Evdokimenko M.D., Ivanov V.V. Specifics of fire preventing arrangements in the forests of Baikal region. *Sib. Lesnoi Zh.*, 2017, no. 5, pp. 63–75. (In Russ.). <https://doi.org/10.15372/SJFS20170506>
- Garmaev E.Z., Tsydyrov B.Z., Dabaeva D.B., Andreev S.G., Ayurzhanayev A.A., Kulikov A.I. The Lake Baikal level regime: retrospection and current status. *Vodnoe Khozyaistvo Rossii: Problemy, Tekhnologii, Upravlenie*, 2017, no. 2, pp. 4–18. (In Russ.).
- Garmaev E.Zh., Ayurzhanayev A.A., Tsydyrov B.Z. et al. Assessment of the spatial and temporal variability of arid ecosystems in the Republic of Buryatia. *Arid Ecosyst.*, 2020, vol. 10, pp. 114–122. <https://doi.org/10.1134/S2079096120020055>
- Global Forest Resources Assessment 2015. Desk Reference*. Rome: FAO, 2015. 244 p.
- Gosudarstvennyi doklad "O sostoyanii i ob okhrane okruzhayushchei srede Rossiiskoi Federatsii v 2017 godu"* [State Report "On the State and Protection of the Environment of the Russian Federation in 2017"]. Moscow: Minprirody Rossii, NPP "Kadastr", 2018. 888 p.
- Hansen M.C., Potapov P.V., Moore R. et al. High-resolution global maps of 21st-century forest cover change. *Science*, 2013, vol. 342, no. 6160, pp. 850–853. <https://doi.org/10.1126/science.1244693>
- Harris I., Jones P.D., Osborn T.J., Lister D.H. Updated high-resolution grids of monthly climatic observations – the CRU TS3.10 Dataset. *Int. J. Climatol.*, 2014, vol. 34, no. 3, pp. 623–642. <https://doi.org/10.1002/joc.3711>
- Kalnay E. et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 1996, vol. 77, no. 3, pp. 437–470.
- Kasischke E.S., Turetsky M.R., Ottmar R.D., French N.H.F., Hoy E.E., Kane E.S. Evaluation of the composite burn index for assessing fire severity in Alaskan black spruce forests. *Int. J. Wildland Fire*, 2008, vol. 17, pp. 515–526.
- Keenan R.J., Reams G.A., Achard F., Freitas J.V., Grainger A., Lindquist E. Dynamics of global forest area: Results from the FAO Global Forest Resources Assessment. *For. Ecol. Manag.*, 2015, vol. 352, pp. 9–20. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.06.014>
- Kokorin A.O. *Izmenenie klimata: obzor Pyatogo otsenochno-go doklada MGEIK* [Climate Change: Review of the Fifth Assessment Report of the IPCC]. Moscow: WWF, 2014. 80 p.
- Loboda T., O'Neal K.J., Csiszar I. Regionally adaptable dNBR-based algorithm for burned area mapping from MODIS data. *Remote Sens. Environ.*, 2007, vol. 109, no. 4, pp. 429–442.
- Medvedeva M.A., Savin I.Yu., Bartalev S.A., Lupyan E.A. Using NOAA-AVHRR data to identify long-term dynamics of vegetation of the Northern Eurasia. *Issled. Zemli Kosm.*, 2011, no. 4, pp. 55–62. (In Russ.).
- Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystems and Human Well-being. Synthesis Report*. Washington D.C.: Island Press, 2005. 160 p.
- Obyazov V.A. Regional response of surface air temperature to global changes (case study of Transbaikalia). *Dokl. Akad. Nauk*, 2015, vol. 461, no. 4, pp. 459–462. (In Russ.).
- Obyazov V.A., Smakhtin V.K. The Transbaikalia rivers' many-year runoff regime: analysis and background forecast. *Vodnoe Khozyaistvo Rossii: Problemy, Tekhnologii, Upravlenie*, 2012, no. 1, pp. 63–72. (In Russ.). <https://doi.org/10.7868/S0869565215100217>
- Pagiola S., von Ritter K., Bishop J. *How Much is an Ecosystem Worth? Assessing the Economic Value of Conservation*. Washington D.C.: World Bank, 2004. <https://doi.org/10.1596/0-8213-6378-6>
- Schepaschenko D.G., Shvidenko A.Z., Lesiv M.Y., Kraxner F., Ontikov P.V., Shchepashchenko M.V. Estimation of forest area and its dynamics in Russia based on synthesis of remote sensing products. *Contemp. Probl. Ecol.*, 2015, vol. 8, no. 7, pp. 811–817. <https://doi.org/10.1134/S1995425515070136>
- Shufang Y., Plotnikova G.P., Simonyan S.H. Perspective development of wood processing of the Siberian Federal District: interaction of China and Russia. *Sistemy. Metody. Tekhnologii*, 2018, vol. 39, no. 3, pp. 116–124. (In Russ.). <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2018-3-116-124>
- Sidorov A.A., Sanzhieva S.E. The chronology of forest fires in the Republic of Buryatia. *Vestn. KrasGAU*, 2018, vol. 139, no. 4, pp. 204–208. (In Russ.).
- Sodnomov B.V., Ayurzhanayev A.A., Chernykh V.V., Zharnikova M.A. Forest cover loss in the Republic of Buryatia in the 21st century. *Usp. Sovrem. Estestvozn.*, 2020, no. 10, pp. 44–49. (In Russ.). <https://doi.org/10.17513/use.37489>
- Sodnomov B.V., Ayurzhanayev A.A., Tsydyrov B.Z., Garmaev E.Zh. Algorithm of assessment of the MODIS NDVI long-term variations. *Zh. SFU. Tekhnika i Tekhnologii*, 2018, vol. 11, no. 1, pp. 61–68. (In Russ.). <https://doi.org/10.17516/1999-494X-0009>
- Stavnikov D. Analysis of sanitary and forest pest status of forests in Buryatia. *Vestn. Buryatskoi Gos. S-Kh. Akad.*, 2013, no. 2, pp. 67–73. (In Russ.).
- Stytsenko F.V., Bartalev S.A., Egorov V.A., Loupian E.A. Method for assessing the degree of forest damage by fires based on MODIS satellite data. *Sovr. Probl. DZZ Kosm.*, 2013, vol. 10, no. 1, pp. 254–266. (In Russ.).
- Stytsenko F.V., Bartalev S.A., Egorov V.A., Loupian E.A. Method for assessing the degree of forest damage by fires based on MODIS satellite data. *Sovr. Probl. DZZ Kosm.*, 2013, vol. 10, no. 1, pp. 254–266. (In Russ.).
- Tishkov A.A. Biosphere functions and ecosystem services of landscapes within the steppe zone of Russia. *Arid Ecosyst.*, 2010, vol. 10, no. 1, pp. 5–15. (In Russ.).
- Tucker C.J., Pinzon J.E., Brown M.E., Slayback D.A., Pak E.W., Mahoney R., Vermote E.F., El Saleous N. An extended AVHRR 8-km NDVI dataset compatible with MODIS and SPOT vegetation NDVI data. *Int. J. Remote Sens.*, 2005, vol. 26, no. 20, pp. 4485–4498.
- Vtoroi otsenochnyi doklad Rosgidrometa ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiiskoi Federatsii* [The Second Assessment Report of Roshydromet on Climate Changes and Their Consequences on the Territory of the Russian Federation]. Moscow: Rosgidromet, 2014. 1009 p.
- Zolotokrylin A.N. Indicator of climate aridity. *Arid. Ekosist.*, 2002, vol. 8, no. 16, pp. 47–69. (In Russ.).

## ПРОБЛЕМЫ ДЕГРАДАЦИИ ЗЕМЕЛЬ И УСТОЙЧИВОГО ЗЕМЛЕПОЛЬЗОВАНИЯ

УДК 551.582

### РОЛЬ ВЕСЕННЕ-ЛЕТНИХ ЗАСУХ В ДИНАМИКЕ АРИДИЗАЦИИ ЗАСУШЛИВЫХ ЗЕМЕЛЬ ЕВРОПЕЙСКОЙ ТЕРРИТОРИИ РОССИИ

© 2022 г. А. Н. Золотокрылин<sup>а</sup> \*, Е. А. Черенкова<sup>а</sup> \*\*, Т. Б. Титкова<sup>а</sup> \*\*\*

<sup>а</sup>Институт географии РАН, Москва, Россия

\*e-mail: zolotokrylin@igras.ru

\*\*e-mail: cherenkova@igras.ru

\*\*\*e-mail: titkova@igras.ru

Поступила в редакцию 16.06.2021 г.

После доработки 08.09.2021 г.

Принята к публикации 12.10.2021 г.

По данным стандартизированного индекса осадков и эвапотранспирации исследована связь изменений годового увлажнения и весенне-летнего, а также летнего увлажнения в 12 субъектах РФ на юге Европейской территории России в 1901–2018 гг. Применение стандартизированного индекса осадков и эвапотранспирации для оценки изменений годового увлажнения обосновано установленной его тесной связью с индексом аридности. Выявлено, что изменения увлажнения в мае–июле более существенные, чем изменения увлажнения за летний сезон, были связаны с изменениями годового увлажнения. Изменения сезонного увлажнения в регионах Поволжья, Заволжья и Северо-Западного Прикаспия объяснили от половины до 65% изменчивости годового увлажнения, а в остальных субъектах юга Европейской территории России вклад сезонного увлажнения варьировал от 30 до 60%. Сравнение выделенных в каждом субъекте фаз аридизации и их систематизация по продолжительности показали, что изменение повторяемости весенне-летних и летних засух оказывает влияние на формирование чередующихся мультидекадных периодов усиления/ослабления аридизации климата на исследуемой территории. Для большинства рассмотренных субъектов характерно два-четыре сухих периода и два-три влажных периода. Установлено, что в начале и середине XX в. на юге Европейской территории России наблюдались более сухие условия весенне-летнего и летнего периодов. Условия повышенного сезонного увлажнения во второй половине XX в. сменились в начале XXI в. более сухой фазой. Показано, что сезонные засухи в сухие периоды являются надежным индикатором засушливого года: весенне-летние засухи – для Ставропольского края и летние засухи – для Волгоградской области и Краснодарского края.

*Ключевые слова:* периоды усиления/ослабления аридизации, индекс аридности, стандартизированный индекс осадков и эвапотранспирации, засуха, засушливые земли, Европейская территория России

DOI: 10.31857/S2587556622010137

#### ВВЕДЕНИЕ

Увеличение повторяемости и интенсивности засух летом в Европе и на юге Европейской территории России (ЕТР) (Второй ..., 2014; Briffa et al., 2009; Spinoni et al., 2017) является одной из причин пристального изучения динамики сезонных засух, влияющих на аридизацию климата. Глобальный анализ крупномасштабных засух на всех континентах во второй половине XX в. свидетельствует об изменениях общей площади с засухами от года к году, но многолетний тренд площадей с засухами незначим (Sheffield et al., 2009). Результаты численных экспериментов с моделями общей циркуляции атмосферы и океана в рамках международного проекта сравнения климатических моделей (Coupled Model Intercomparison

Project, CMIP) свидетельствуют о неопределенности оценок ожидаемого типа потепления (аридный или гумидный тип) на юге ЕТР в середине XXI в. (Cherenkova, Zolotokrylin, 2012).

Режим увлажнения на юге ЕТР характеризуется сильной межгодовой изменчивостью, что затрудняет разработку мер по адаптации отраслей народного хозяйства к климатическим изменениям. Весенние и летние условия увлажнения (и его экстремумы) крайне важны для полноценного развития растений. Результаты изучения динамики аридизации и деградации земель юга ЕТР в предыдущих работах (Золотокрылин и др., 2020а, б) показали отсутствие значимых трендов аридизации за более чем вековой период. Вместе с тем были выявлены внутривековые периоды усиления

**Таблица 1.** Коэффициент детерминации  $R^2$  регрессии годового SPEI на: SPEI в мае–июле (I) и SPEI в июне–августе (II) по 12 субъектам на юге ЕТР в 1901–2018 гг.

Субъект РФ	Курская область	Белгородская область	Воронежская область	Самарская область	Оренбургская область	Саратовская область	Волгоградская область	Ростовская область	Ставропольский край	Краснодарский край	Республика Калмыкия	Астраханская область
№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
I	0.34	0.39	0.52	0.55	0.62	0.62	0.65	0.58	0.57	0.44	0.62	0.64
II	0.44	0.45	0.52	0.53	0.59	0.60	0.63	0.54	0.58	0.42	0.59	0.60

ния и ослабления аридизации, в зависимости от частоты и интенсивности весенне-летних засух.

Цель работы состоит в обосновании метода определения фаз аридизации климата с учетом количества атмосферных осадков и эвапотранспирации на засушливых землях ЕТР. Метод заключается в определении роли повторяемости весенне-летних и летних засух в формировании чередующихся мультидекадных периодов (фаз) аридизации климата (кратко фазы аридизации) на исследуемой территории.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Территория исследования представлена субгумидными, сухими субгумидными, семиаридными зонами на юге ЕТР, на которой в настоящее время расположены 12 субъектов РФ (табл. 1). Актуальность рассмотрения этой территории засушливых земель (Золотокрылин, Черенкова, 2009) обусловлена наблюдением (периодическим или постоянным в зависимости от региона) условий низкого увлажнения, характерных для полузасушливой зоны, с повышенными рисками развития процессов деградации земель и опустынивания.

В предыдущих работах (например, Золотокрылин и др., 2020а, б) авторы исследовали динамику аридности территории в субъектах РФ с использованием годового индекса аридности (AI), представляющего отношение суммарных за год осадков к суммарной годовой испаряемости, — условной величине, характеризующей максимально возможное (потенциально возможное, не ограниченное запасами воды) испарение в данной местности при существующих атмосферных условиях. В исследовании значения индекса AI за каждый год в период 1901–2018 гг. были рассчитаны с привлечением данных месячных сумм осадков и потенциальной эвапотранспирации, вычисленной по методу Пенмана (Penman, 1948, 1956) с использованием среднемесячных данных о радиационном балансе поверхности, температуре, относительной влажности воздуха и скорости ветра. Ранее авторами было выполнено сравнение различных методов расчета испаряемости

на юге Русской равнины, в результате которого метод Пенмана был отнесен к наиболее надежным методам (Черенкова, Шумова, 2007). Используемые данные об осадках и потенциальной эвапотранспирации из глобального архива CRU TS4.03 (Climatic Research Unit) с пространственным разрешением  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$  были подготовлены в Университете Восточной Англии (Hargis et al., 2014). В этой организации расчет потенциальной эвапотранспирации  $ET_0$  (мм день<sup>-1</sup>) был выполнен по формуле (1), которая характеризует испарение с предположительно хорошо развитого зеленого травяного покрова (гипотетическая эталонная культура) высотой 0.12 м и с полностью увлажненной почвы.

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273.16} U_2 (e_a - e_d)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)}, (1)$$

где  $R_n$  — радиационный баланс на подстилающей поверхности (МДж м<sup>-2</sup> сут<sup>-1</sup>);  $G$  — поток тепла из почвы (МДж м<sup>-2</sup> сут<sup>-1</sup>), принимаемый здесь равным 0;  $T$  — среднесуточная температура на высоте 2 м (°C);  $U_2$  — скорость ветра, измеренная на высоте 2 м (м с<sup>-1</sup>);  $(e_a - e_d)$  — дефицит давления насыщенного водяного пара на высоте 2 м (кПа);  $\Delta$  — наклон кривой давления водяного пара (кПа °C<sup>-1</sup>);  $\gamma$  — психрометрическая константа (кПа °C<sup>-1</sup>).

Такой метод расчета испаряемости использован Продовольственной и сельскохозяйственной организацией ООН (Food and Agriculture Organization, FAO) (Allen et al., 1998) для исследуемых ландшафтов.

Индекс аридности используется для определения границ аридных зон, как это было сделано, например, во Всемирном атласе опустынивания (World ..., 1992). Как показано в работе (Золотокрылин и др., 2020а), изолиния AI = 0.5, отделяющая сухую субгумидную зону от субгумидной зоны, проходит через несколько регионов. Однако доля лет с соответствующими этим зонам субгумидными и семиаридными условиями в увлажнении этих регионов различна. Так, в Оренбургской, Саратовской и Ростовской областях преоб-

ладали субгумидные условия (более чем в 65% лет периода), в 5% лет отмечались семиаридные условия, а в остальные годы условия увлажнения были близки к сухим субгумидным. Ставропольский край и Волгоградская область расположены на сухих субгумидных территориях, но здесь в более чем в трети лет возможно распространение субгумидных условий. Наблюдение сухих субгумидных и семиаридных условий примерно в равных долях характеризует увлажнение в Республике Калмыкии. Наиболее засушливой является Астраханская область с семиаридными условиями увлажнения, в которой доля лет с сухими субгумидными условиями составила чуть более 10%.

При анализе динамики аридности в работах (Золотокрылин и др., 2020а, б) предполагалось, что значения AI ниже/выше среднего значения сигнализируют об усилении/ослаблении аридизации территории. В данном исследовании для оценки аномалий годового и сезонного увлажнения нами использован относительно новый количественный показатель – стандартизированный индекс осадков и эвапотранспирации (Standardized Precipitation Evapotranspiration Index, SPEI). Использование индекса SPEI при выявлении периодов аридизации/гумидизации является более предпочтительным по сравнению с AI. Преимущество подхода, использованного при расчете SPEI, состоит в универсальности определения градаций разности осадков и испаряемости в регионах с различным климатом в соответствии со свойствами функции нормального распределения. В этом случае на хвосты распределения, ассоциирующиеся с экстремумами, приходится по 15.87% наблюдений. Значения индекса SPEI вычисляются с помощью преобразования функции вероятности лог-логистического распределения разности осадков и эвапотранспирации (наиболее близко соответствующей их распределению) в функцию нормального распределения с нулевым средним и среднеквадратическим отклонением, равным единице (Vicente-Serrano et al., 2010). Подробное описание процедуры получения значений стандартизированного индекса осадков (Standardized Precipitation Index, SPI), одинаковой для SPI и SPEI, представлено в (Черенкова, Золотокрылин, 2016). Значения индекса SPEI, при расчете которого использованы те же данные осадков и эвапотранспирации, что применялись при расчете AI, были получены с помощью инструментария Пиренейского Института Экологии (Instituto Pirenaico de Ecologia) (Vicente-Serrano et al., 2010). Отрицательные/положительные значения индекса SPEI характеризуют дефицит/избыток годового (сезонного) увлажнения с учетом осадков и испаряемости для того региона, где рассчитывался индекс. Годы с отрицательными/положительными значениями годового индекса SPEI были отнесены нами к сухим/влаж-

ным годам. Засушливый год или сезонная засуха наблюдается при значениях SPEI за все месяцы года или за сезон соответственно, если эти значения ниже 1. В предыдущих работах авторов было показано, что существенный недостаток годового увлажнения в бассейнах крупных рек ЕТР, рассчитанного с использованием SPEI, приводил к низкому речному стоку Дона и Волги в текущем или следующем году, а Северной Двины и Печоры – в текущем году (Черенкова, Сидорова, 2021). Сравнение частоты засух в регионах ЕТР, выявленных с помощью SPEI и наиболее широко используемого в отечественной гидрометеорологической практике гидротермического коэффициента Селянинова (ГТК), продемонстрировало недооценку индексом SPEI частоты летней засухи в Северо-Западном Прикаспии, а также в ряде областей Поволжья и Заволжья (Черенкова, Золотокрылин, 2016). Это связано с различием методологических подходов к определению градаций увлажнения (как засух, так и избыточного увлажнения) по ГТК и по SPEI. В частности, в некоторых засушливых регионах по данным ГТК выявляется перманентная сезонная засуха, а в регионах с более влажным климатом засуха по ГТК может никогда не наблюдаться. В то время как низкие отрицательные значения SPEI характеризуют “нехарактерный” режим дефицита осадков в любой местности (в том числе и для аридных, и для гумидных регионов).

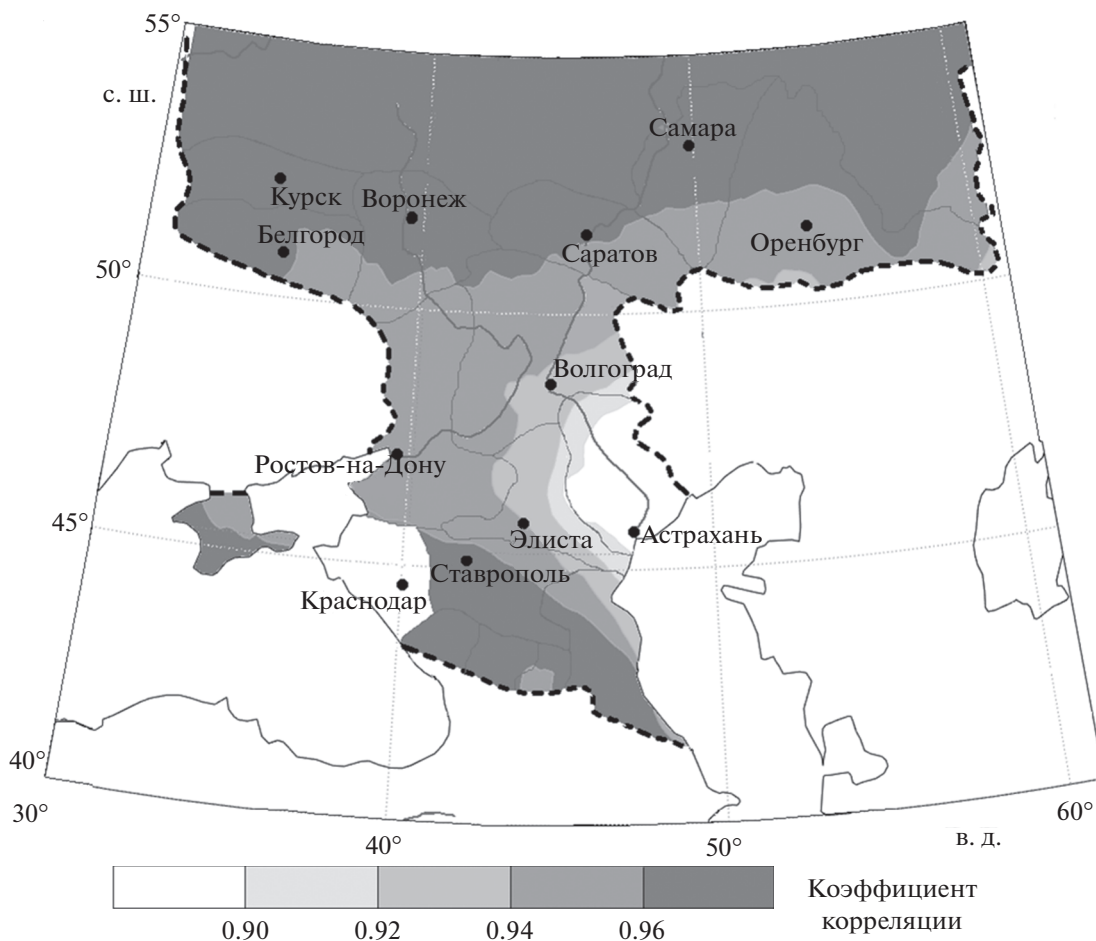
Под фазами аридизации климата понимаются чередующиеся периоды усиления и ослабления аридизации длительностью от одного до нескольких десятилетий.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для достижения поставленных целей следует на уровне регионов юга ЕТР: 1) определить тесноту связи 12-месячного (годового) SPEI с годовым индексом аридности, 2) исследовать связь годового индекса SPEI (январь–декабрь) с 3-месячными индексами SPEI за весенне-летний и летний периоды в 1901–2018 гг., 3) выявить фазы аридизации климата на основе оценки весенне-летней и летней изменчивости разности осадков и эвапотранспирации (3-месячный индекс SPEI май–июль и июнь–август), 4) провести анализ вековой динамики весенне-летних и летних засух (SPEI, май–июль и июнь–август) по отношению к фазам аридизации.

### *Связь SPEI за январь–декабрь с годовым индексом аридности*

Корреляционная связь 12-месячного SPEI (январь–декабрь) с индексом аридности на юге ЕТР в 1901–2018 гг. характеризуется высокими коэффициентами корреляции от 0.9 в семиарид-



**Рис. 1.** Пространственное распределение коэффициентов корреляции между индексом аридности AI и годовым SPEI на юге ЕТР в 1901–2018 гг.

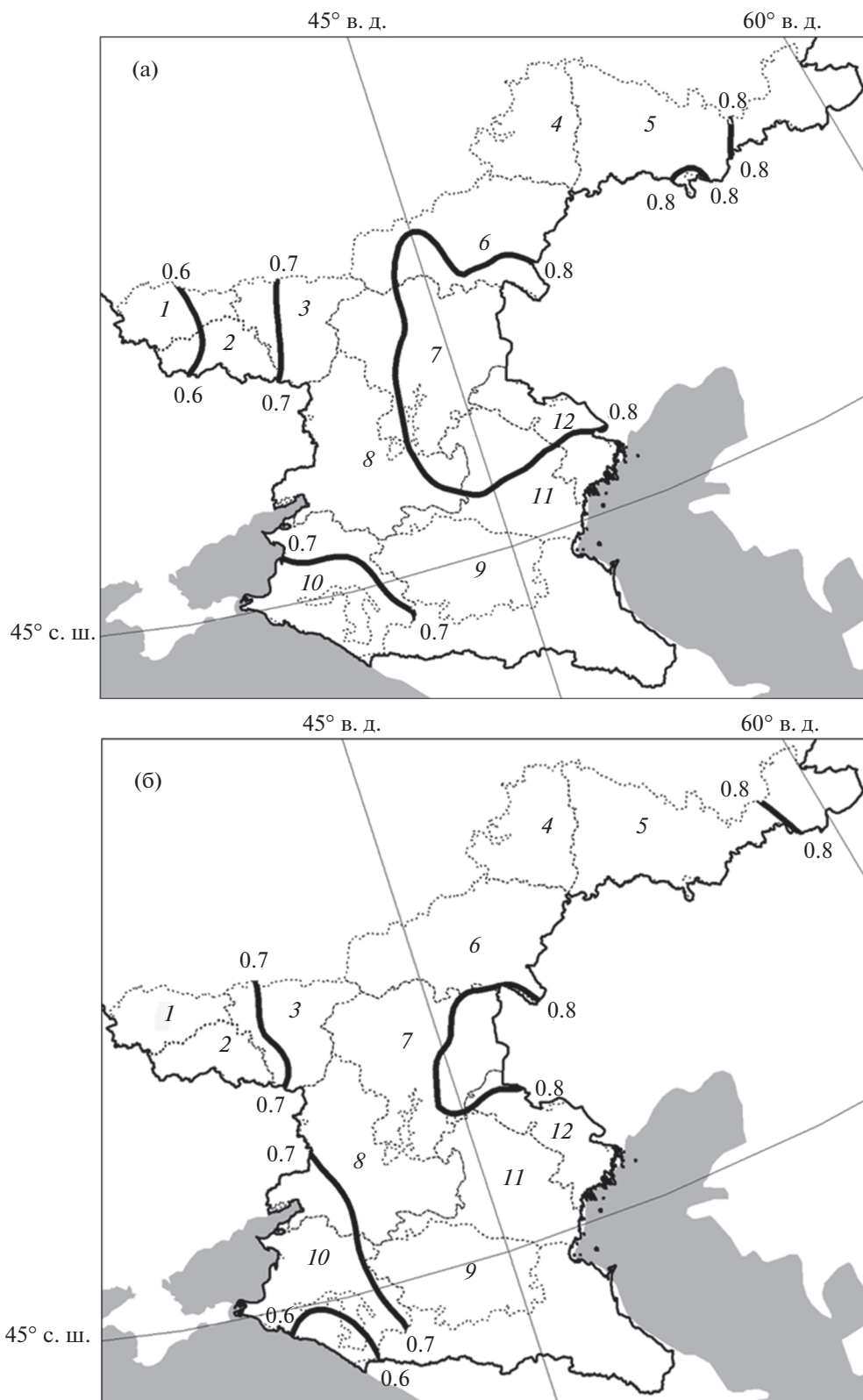
ной зоне (большая часть Астраханской области) до 0.98 в северной субгумидной зоне (рис. 1). Тесная связь годового AI и годового SPEI позволяет при исследовании динамики аридности сделать равноценную замену AI на SPEI.

#### *Связь годового индекса SPEI с индексами SPEI за май–июль и июнь–август*

Анализ пространственного распределения коэффициентов корреляции между годовым индексом и сезонными индексами SPEI на юге ЕТР в 1901–2018 гг. показал, что на большей части территории изменения увлажнения в мае–июле были более тесно связаны с изменчивостью годового SPEI в 1901–2018 гг., чем изменения увлажнения за летний период (июнь–август) (рис. 2а, б). Как показано на рис. 2а и б, коэффициенты корреляции между индексами возрастают с запада на восток. Увеличение коэффициента корреляции между индексами SPEI к востоку объясняется тем, что с продвижением на восток и юго-восток наблюдается уменьшение годовых сумм осадков

более чем в полтора раза: от 500 мм/год в расположенных на западе субъектах юга ЕТР до 300 мм/год в Астраханской области и в Калмыкии, а также на юго-востоке Оренбургской области. При этом для юга ЕТР характерен максимум осадков и испаряемости в летний период. Поэтому доля летних осадков, а также испаряемости в годовой сумме возрастает, что ведет к повышению коэффициента корреляции для 3-месячных значений SPEI в период, охватывающий летние месяцы.

Из табл. 1 видно, что наибольший вклад в изменчивость годового увлажнения в Курской и Белгородской областях внесли изменения летнего увлажнения (44 и 45% соответственно). Вклад изменений весенне-летнего и летнего увлажнения в изменения годового увлажнения в Краснодарском крае был приблизительно одинаковым (44 и 42% соответственно). При этом доля объясненной изменчивости годового увлажнения изменениями сезонного увлажнения в остальных рассмотренных субъектах РФ превышала 50% и



**Рис. 2.** Пространственное распределение коэффициентов корреляции между годовым индексом SPEI и индексом SPEI за май–июль (а) и июнь–август (б) на юге ЕТР в 1901–2018 гг.

*Примечание:* Административные границы субъектов РФ показаны пунктирными линиями. Номера и названия субъектов РФ см. в табл. 1.

**Таблица 2.** Периоды с более влажными (В) (отмечены серым цветом) и более сухими (С) условиями увлажнения (май–июль) по десятилетиям в 1901–2018 гг.

Субъект РФ	1901–1910	1911–1920	1921–1930	1931–1940	1941–1950	1951–1960	1961–1970	1971–1980	1981–1990	1991–2000	2001–2010	2011–2018
Курская область	В	В	В	С	С	С	С	В	В	В	С	С
Белгородская область	В	В	В	С	С	С	С	В	В	В	С	С
Воронежская область	С	В	В	С	С	С	С	В	В	В	В	С
Самарская область	С	В	С	С	В	С	В	В	В	В	В	С
Оренбургская область	С	В	В	С	В	С	В	С	С	В	В	С
Саратовская область	С	В	В	С	В	С	В	В	В	В	В	С
Волгоградская область	С	В	В	В	В	С	С	В	В	В	В	С
Ростовская область	В	В	В	В	С	С	С	В	В	В	С	С
Ставропольский край	В	В	С	В	С	С	С	С	В	В	С	С
Краснодарский край	В	В	С	С	С	С	С	С	В	В	С	С
Республика Калмыкия	С	В	В	В	С	С	С	С	В	В	С	С
Астраханская область	С	В	В	В	В	С	С	С	В	В	С	С

*Примечание:* Периоды определены по 10-летним скользящим средним 3-месячного SPEI для мая–июля для регионов юга ЕТР.

отличалась незначительно для весенне-летнего и летнего увлажнения. Изменениями сезонного увлажнения на территории Поволжья, Заволжья и Северо-Западного Прикаспия объясняется 53–65% изменений годового увлажнения (см. табл. 1).

#### *Анализ вековой динамики периодов весенне-летнего и летнего увлажнения на юге ЕТР*

Основываясь на оценке весенне-летних и летних изменений разности осадков и эвапотранспирации (3-месячный индекс SPEI для июля и августа) в среднем по десятилетиям, можно выделить периоды повышенной/пониженной аридности на юге ЕТР в XX – начале XXI вв.

Чередование периодов с различными условиями весенне-летнего увлажнения в 1901–2018 гг. (сухой, влажный) прослеживаются во всех рассмотренных субъектах (табл. 2). Количество сухих десятилетий для весенне-летних условий изменялось от одного до шести, а влажных десятилетий – от одного до пяти. Для большинства субъектов в тот же временной интервал наблюда-

лись 2–3 сухих и 2 влажных периода. Исключение составляет Оренбургская область, где чередование сухого и влажного периода для весны-лета происходило более часто.

Для летнего увлажнения на юге ЕТР в 1901–2018 гг. выделены преобладающие режимы увлажнения с тремя-четырьмя сухими периодами и двумя-тремя влажными периодами (табл. 3). При этом количество сухих десятилетий изменялось от одного до трех, а влажных десятилетий – от одного до пяти. Периоды с различным характером увлажнения наиболее часто сменяли друг друга в Самарской, Оренбургской и Саратовской областях.

В целом более сухие весенне-летние и летние условия на юге ЕТР отмечались в начале и середине XX в. (в 1901–1910, 1931–1940, 1951–1960 гг.), а также в начале XXI в. (рис. 3а, б). Условия повышенного увлажнения как весенне-летнего, так и летнего, наблюдавшиеся во всех рассмотренных регионах во второй половине XX в., сменились в начале XXI в. более сухими условиями.

**Таблица 3.** Периоды с более влажными (В) (отмечены серым цветом) и более сухими (С) условиями увлажнения (июнь–август) по десятилетиям в 1901–2018 гг.

Субъект РФ	1901–1910	1911–1920	1921–1930	1931–1940	1941–1950	1951–1960	1961–1970	1971–1980	1981–1990	1991–2000	2001–2010	2011–2018
Курская область	В	В	В	С	В	С	С	В	В	С	С	С
Белгородская область	В	В	В	В	С	С	С	В	В	В	С	С
Воронежская область	С	В	В	В	С	С	С	В	В	В	С	С
Самарская область	С	В	В	С	В	С	В	В	В	В	В	С
Оренбургская область	С	В	В	С	В	С	В	В	В	В	С	С
Саратовская область	С	В	В	С	В	С	В	В	В	В	С	С
Волгоградская область	С	В	В	В	В	С	С	В	В	В	С	С
Ростовская область	С	В	В	В	В	С	С	В	В	В	С	С
Ставропольский край	В	В	В	В	С	С	В	В	В	В	С	С
Краснодарский Край	С	В	В	В	В	С	В	В	В	В	С	С
Республика Калмыкия	С	В	В	В	С	С	С	В	В	В	С	С
Астраханская область	С	В	В	В	В	С	В	В	В	В	С	С

*Примечание:* Периоды определены по 10-летним скользящим средним 3-месячного SPEI для июня–августа для регионов юга ЕТР.

#### *Сравнение количества случаев наблюдения года с сезонной засухой в засушливый год по данным SPEI (%)*

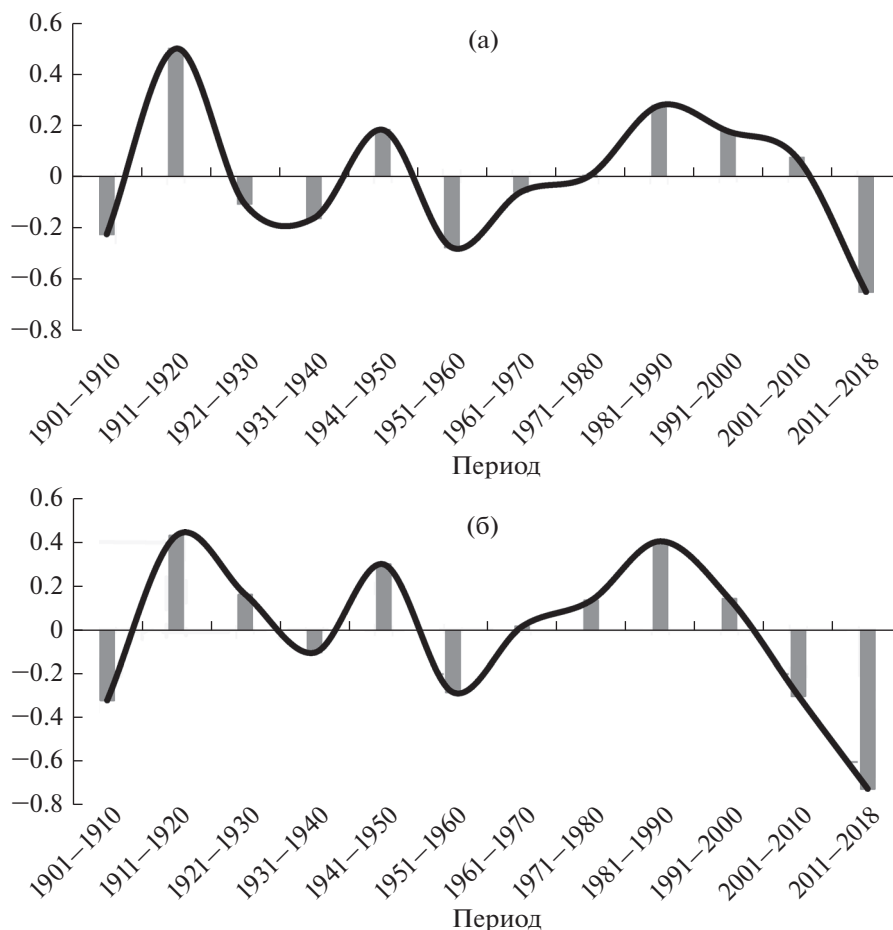
Рассмотрим количество случаев одновременного наблюдения сезонной засухи (весенне-летней и летней) и засушливого года во влажные и сухие периоды. Результаты такого сравнения по десятилетиям в 1901–2018 гг. неоднозначны по субъектам юга ЕТР. Совпадение сезонной засухи и засушливого года наблюдалось чаще именно в сухие периоды в большинстве рассмотренных субъектов (рис. 4а, б). Отметим, что повышенная частота таких совпадений в сухие периоды по сравнению с влажными периодами отмечена в мае–июле в Ставропольском крае (в четыре раза), а также в июне–августе в Оренбургской, Ростовской, Саратовской областях и в Краснодарском крае (в два и более раза).

Наиболее надежные оценки связи сезонных засух и засух в масштабе года можно дать для нескольких регионов юга ЕТР. В сухие периоды сезонные засухи являются индикатором засушливого

года в случае наблюдения весенне-летней засухи: в Саратовской области, Республике Калмыкии и Краснодарском крае (с вероятностью 0.6), в Воронежской и Оренбургской областях (с вероятностью 0.7), в Ставропольском крае с вероятностью 0.9 (см. рис. 4а), в случае наблюдения летней засухи: в Республике Калмыкии и Ставропольском крае (с вероятностью 0.6), в Оренбургской и Ростовской областях (с вероятностью 0.7), в Саратовской области (с вероятностью 0.8), в Волгоградской области и Краснодарском крае (с вероятностью 0.9) (см. рис. 4б). Индикатором засушливого года во влажные периоды являются сезонные засухи в Воронежской и Самарской областях, а также в Ставропольском крае (с вероятностью 0.6), в Волгоградской области и Республике Калмыкии (с вероятностью 0.7).

Предложенный подход позволяет заранее по сезонным засухам идентифицировать засушливые годы в 10-летнем периоде во многих субъектах юга ЕТР, базируясь на том, что засухи вносят





**Рис. 3.** Изменения 10-летних скользящих средних значений индекса SPEI (безразмерный) на юге ЕТР за май–июль (а) и июнь–август (б), усредненных по десятилетиям. Сглаженная кривая показывает переходы между сухими и влажными периодами весенне-летнего (а) и летнего (б) увлажнения.

основной вклад в формирование засушливых условий конкретного года.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

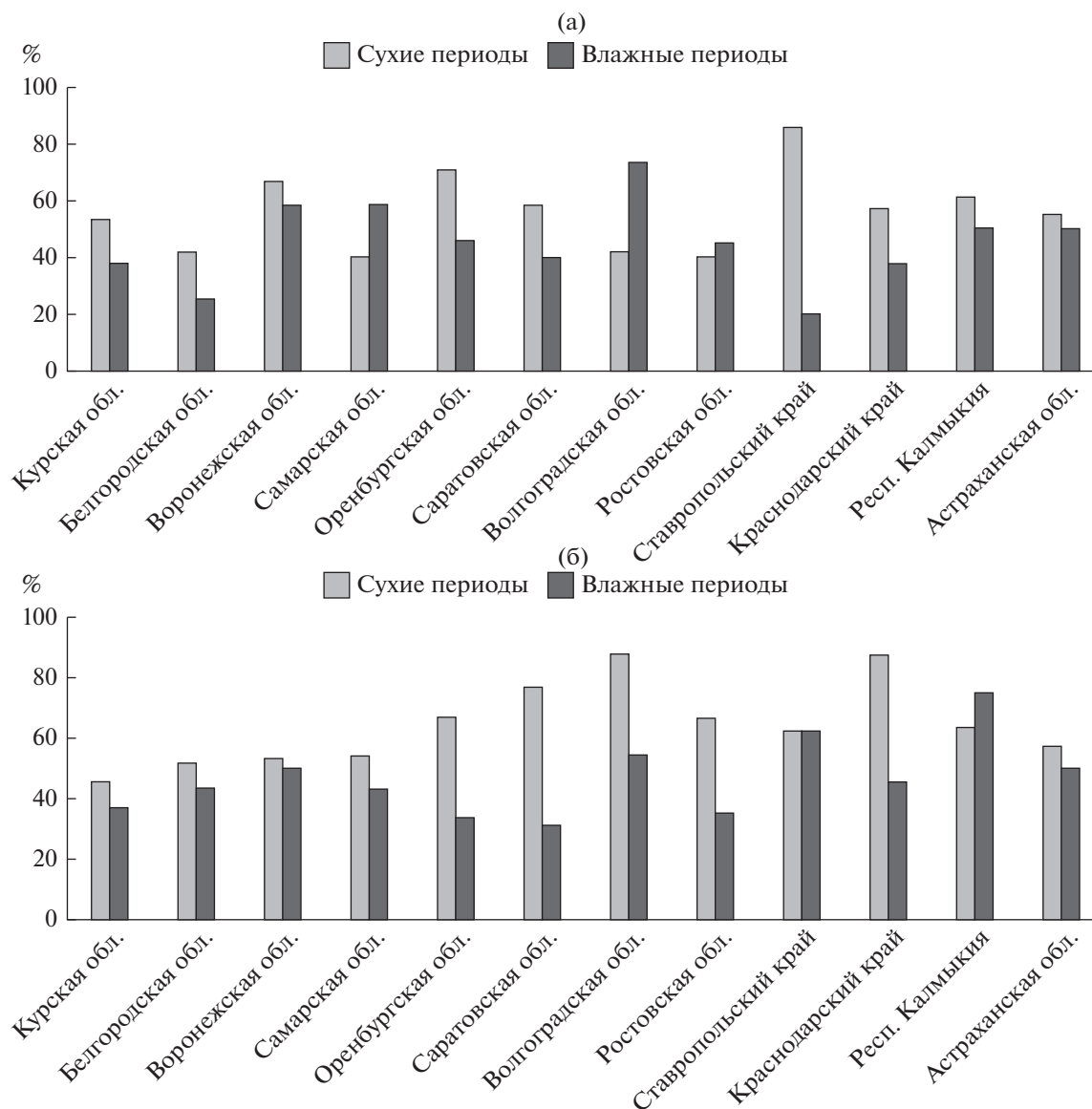
Обоснован метод определения фаз усиления/ослабления аридизации климата засушливых земель на юге ЕТР с использованием индекса SPEI. Метод базируется на выявленной тесной корреляционной связи годового индекса аридности AI и годового индекса SPEI, варьирующейся от 0.9 в семиаридной зоне до 0.98 в более северной субгумидной зоне. На исследуемой территории выявлены мультideкадные колебания годового индекса SPEI, а также чередование сухих и влажных периодов сезонного увлажнения, как правило, наблюдающихся в течение несколько десятилетий. При этом для большинства из 12 рассмотренных субъектов юга ЕТР характерно 2–4 сухих периода и 2–3 влажных периода.

Установлено, что изменения увлажнения в мае–июле на юге ЕТР более тесно, чем в летний

сезон, были связаны с изменениями годового увлажнения (см. рис. 2а, б). Изменения сезонного увлажнения в регионах Поволжья, Заволжья и Северо-Западного Прикаспия объяснили 53–65% изменчивости годового увлажнения, а в остальных субъектах юга Европейской территории России – 34–58%.

Весенне-летнее и летнее увлажнение на юге ЕТР понижалось в начале и середине XX в., а также в начале XXI в. Условия повышенного сезонного увлажнения во второй половине XX в. сменились в начале XXI в. более сухими условиями. Засухи в весенне-летний и летний сезон на фоне засушливого года наблюдались чаще в сухие периоды в большинстве рассмотренных субъектов. Показано, что наиболее высока вероятность засушливого года в сухой многолетний период при наблюдении весенне-летней засухи в Ставропольском крае, а также в Волгоградской области и Краснодарском крае в случае летней засухи.

Таким образом, определение фаз усиления и ослабления аридизации климата возможно по



**Рис. 4.** Доля лет (%) с засухой в весенне-летний (а) и летний (б) сезоны в засушливый год по влажным и сухим сезонным периодам (отображенным в табл. 2 и 3) в субъектах на юге ЕТР по данным SPEI, 1901–2018 гг.

межгодовой изменчивости разности осадков и эвапотранспирации (с использованием индекса SPEI) на засушливых землях юга ЕТР. Повторяемость весенне-летних и летних засух оказывает ощутимое влияние на чередование мультideкадных периодов усиления/ослабления аридизации климата на исследуемой территории.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование проведено в рамках научной темы № 0127-2019-0010 (AAAA-A19-119102890091-1).

#### FUNDING

The study was conducted within the framework of the scientific theme no. 0127-2019-0010 (AAAA-A19-119102890091-1).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Второй оценочный доклад. Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. М.: Росгидромет, 2014. 1008 с.

- Золотокрылин А.Н., Черенкова Е.А.* Площадь засушливых земель равнин России // *Аридные экосистемы*. 2009. Т. 15. № 1 (37). С. 5–12.
- Золотокрылин А.Н., Черенкова Е.А., Титкова Т.Б.* Аридизация засушливых земель Европейской части России и связь с засухами // *Изв. РАН. Сер. геогр.* 2020а. Т. 84. № 2. С. 207–217.  
<https://doi.org/10.31857/S258755662002017X>
- Золотокрылин А.Н., Титкова Т.Б., Черенкова Е.А.* Характеристики весенне-летних засух в сухие и влажные периоды на юге Европейской России // *Арид. экосистемы*. 2020б. Т. 26. № 4 (85). С. 76–83.  
<https://doi.org/10.24411/1993-3916-2020-10121>
- Черенкова Е.А., Шумова Н.А.* Испаряемость в количественных показателях климата // *Арид. экосистемы*. 2007. Т. 13. № 33–34. С. 55–67.
- Черенкова Е.А., Золотокрылин А.Н.* Модельные оценки динамики увлажнения равнин России к середине XXI в. // *Метеорология и гидрология*. 2012. № 11. С. 29–37.  
<https://doi.org/10.3103/S1068373912110039>
- Черенкова Е.А., Золотокрылин А.Н.* О сравнимости некоторых количественных показателей засухи // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2016. Т. 2. С. 79–94.  
<https://doi.org/10.21513/2410-8758-2016-2-79-94>
- Черенкова Е.А., Сидорова М.В.* Оценка современных условий недостаточного увлажнения, влияющих на маловодность в бассейнах крупных рек Европейской части России // *Водные ресурсы*. 2021. Т. 48. № 3. С. 260–269.  
<https://doi.org/10.31857/S0321059621030068>
- Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., Smith M.* Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. Rome: FAO, 1998. 300 p.
- Briffa K.R., Van Der Schrier G., Jones P.D.* Wet and dry summers in Europe since 1750: evidence of increasing drought // *Int. J. Climatol.* 2009. V. 29. P. 1894–1905.  
<https://doi.org/10.1002/joc.1836>
- Harris I., Jones P.D., Osborn T.J., Lister D.H.* Updated high-resolution grids of monthly climatic observations – the CRU TS3.10 Dataset // *Int. J. Climatol.* 2014. V. 34. P. 623–642.  
<https://doi.org/10.1002/joc.3711>
- Penman H.L.* Natural evaporation from open water, bare soil and grass // *Proc. Roy. Soc. London: A193*, 1948. P. 120–146.
- Penman H.L.* Estimating evaporation // *Eos, Trans. Am. Geophys. Union*. 1956. Vol. 37 (1). P. 43–50.
- Sheffield J., Andreadis K.M., Wood E.F., Lettenmaier D.P.* Global and continental drought in the second half of the twentieth century: severity-area-duration analysis and temporal variability of large-scale events // *J. Climate*. 2009. V. 22. P. 1962–1981.  
<https://doi.org/10.1175/2008JCLI2722.1>
- Spinoni J., Naumann G., Vogt J.V.* Pan-European seasonal trends and recent changes of drought frequency and severity // *Global and Planetary Change*. 2017. V. 148. P. 113–130.  
<https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2016.11.013>
- World Atlas of Desertification*. UNEP. London: Edward Arnold, 1992. 63 p.
- Vicente-Serrano S.M., Beguería S., López-Moreno J.I.* A multi-scalar drought index sensitive to global warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index – SPEI // *J. Climate*. 2010. V. 23. P. 1696–1718.  
<https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1>

## Role of Spring–Summer Drought in the Dynamics of Aridization of Arid Lands in European Russia

A. N. Zolotokrylin<sup>1, \*</sup>, E. A. Cherenkova<sup>1, \*\*</sup>, and T. B. Titkova<sup>1, \*\*\*</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

\**e-mail: zolotokrylin@igras.ru*

\*\**e-mail: cherenkova@igras.ru*

\*\*\**e-mail: titkova@igras.ru*

The relationship of changes in annual moisture with spring–summer and summer moisture in twelve federal subjects in the south of European Russia in 1901–2018 was analyzed using the Standardized-Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI). The revealed close relationship between the annual SPEI and the aridity index justifies the usage of the SPEI to assess changes in annual moisture conditions. It was found that changes in moisture in May–July were associated with fluctuations in annual moisture more significantly than those in summer moisture. Changes in the seasonal moisture in the Volga, Trans-Volga and Northwestern Caspian regions explained 50–65% of the variability of annual moisture, while the contribution of the seasonal moisture varied from 30 to 60% in other federal subjects of the south of European Russia. The comparison of the aridization phases identified in each federal subject and their systematization by the duration showed that the change in the frequency of spring–summer and summer droughts affects the formation of alternating multi-decadal periods of increasing/decreasing climate aridization in the study area. Two-four dry periods and two-three wet periods are typical for most of the considered federal subjects. It was revealed that drier conditions of the spring–summer and summer periods were observed at the beginning and middle of the 20th century in the south of European Russia. The increasing seasonal moisture in the second half of the 20th century was replaced by a drier phase at the beginning of the 21st century. It was shown that droughts during

dry periods are a reliable indicator of a dry year: spring-summer droughts in Stavropol krai and summer droughts in Volgograd oblast and Krasnodar krai.

*Keywords:* periods of intensification/weakening of aridization, aridity index, standardized precipitation evapotranspiration index, drought, arid lands, European Russia

## REFERENCES

- Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., Smith M. *Crop Evapotranspiration. Guidelines for Computing Crop Water Requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper, no. 56. Rome: FAO, 1998. 300 p.
- Briffa K.R., Van Der Schrier G., Jones P.D. Wet and dry summers in Europe since 1750: evidence of increasing drought. *Int. J. Climatol.*, 2009, vol. 29, pp. 1894–1905. <https://doi.org/10.1002/joc.1836>
- Cherenkova E.A., Shumova N.A. Potential evapotranspiration in quantity indicators of climate. *Arid Ekosist.*, 2007, vol. 13, nos. 33–34, pp. 55–67. (In Russ.).
- Cherenkova E.A., Sidorova M.V. On the impact of insufficient atmospheric moistening on the low annual discharge of large rivers in European Russia. *Water Resour.*, 2021, vol. 48, pp. 351–360. <https://doi.org/10.1134/S0097807821030064>
- Cherenkova E.A., Zolotokrylin A.N. Model estimates of moistening conditions on the Russian plains by the middle of the 21st century. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2012, vol. 37, nos. 11–12, pp. 704–710. <https://doi.org/10.3103/S1068373912110039>
- Cherenkova E.A., Zolotokrylin A.N. On the comparability of some quantitative drought indices. *Fundamental'naya. i Prikladnaya Klimatologiya*, 2016, vol. 2, pp. 79–94. (In Russ.). <https://doi.org/10.21513/2410-8758-2016-2-79-94>
- Harris I., Jones P.D., Osborn T.J., Lister D.H. Updated high-resolution grids of monthly climatic observations—the CRU TS3.10 Dataset. *Int. J. Climatol.*, 2014, vol. 34, pp. 623–642. <https://doi.org/10.1002/joc.3711>
- Penman H.L. Estimating evaporation. *Eos, Trans. Am. Geophys. Union*, 1956, vol. 37, no. 1, pp. 43–50.
- Penman H.L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proc. R. Soc. Lond., A Math. Phys. Sci.*, 1948, vol. 193, pp. 120–145.
- Sheffield J., Andreadis K.M., Wood E.F., Lettenmaier D.P. Global and continental drought in the second half of the twentieth century: severity-area-duration analysis and temporal variability of large-scale events. *J. Climate.*, 2009, vol. 22, pp. 1962–1981. <https://doi.org/10.1175/2008JCLI2722.1>
- Spinoni J., Naumann G., Vogt J.V. Pan-European seasonal trends and recent changes of drought frequency and severity. *Glob. Planet. Change*, 2017, vol. 148, pp. 113–130. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2016.11.013>
- Vicente-Serrano S M, Beguería S., López-Moreno J.I. A multi-scalar drought index sensitive to global warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index – SPEI. *J. Climate*, vol. 23, pp. 1696–1718. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1>
- Vtoroi otsenochnyi doklad Rosgidrometa ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiiskoi Federatsii* [The Second Assessment Report of Roshydromet on Climate Changes and Their Consequences on the Territory of the Russian Federation]. Moscow: Rosgidromet, 2014. 1009 p.
- World Atlas of Desertification*. London: UNEP, Edward Arnold, 1992. 63 p.
- Zolotokrylin A.N., Cherenkova E.A. The area of the dry plain lands of Russia. *Arid Ekosist.*, 2009, vol. 15, no. 1, pp. 5–12. (In Russ.).
- Zolotokrylin A.N., Cherenkova E.A., Titkova T.B. Aridization of drylands in the European part of Russia: secular trends and links to droughts. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2020, vol. 84, no. 2, pp. 207–217. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S258755662002017X>
- Zolotokrylin A.N., Titkova T.B., Cherenkova E.A. Characteristics of spring–summer drought in dry and wet periods in the south of European Russia. *Arid Ecosyst.*, 2020, vol. 10, pp. 322–328. <https://doi.org/10.1134/S2079096120040216>

## ПРОБЛЕМЫ ДЕГРАДАЦИИ ЗЕМЕЛЬ И УСТОЙЧИВОГО ЗЕМЛЕПОЛЬЗОВАНИЯ

УДК 504.455;528.88;551.583

### ДИНАМИКА ПЛОЩАДИ ОЗЕР В СТЕПНОЙ ЗОНЕ АЛТАЙСКОГО КРАЯ В УСЛОВИЯХ АНТРОПОГЕННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ И КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ

© 2022 г. Д. В. Черных<sup>а</sup>, \*, Р. Ю. Бирюков<sup>а</sup>, Д. К. Першин<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Институт водных и экологических проблем СО РАН, Барнаул, Россия

\*e-mail: chernykhd@mail.ru

Поступила в редакцию 09.07.2021 г.

После доработки 09.08.2021 г.

Принята к публикации 12.10.2021 г.

Неотъемлемым элементом степных равнин Алтайского края, в частности Кулундинской низменности, является наличие большого количества различных по площади реликтовых озер. На основе данных дистанционного зондирования (космические снимки Landsat и Sentinel-2) за период 1989–2020 гг. проведен анализ динамики площадей водоемов в двух бессточных озерных системах Кулундинской низменности – Кулундинской и Плотавской. Выявлено отсутствие выраженных тенденций к направленному сокращению площадей водоемов. Несмотря на наличие нескольких сильных засух за последние 30 лет, водоемы Кулундинской и Плотавской озерных систем не испытывали каких-либо чрезвычайно резких сокращений площадей водной поверхности. Для оценки продолжительности и интенсивности засушливых периодов в работе был использован индекс SPEI. Показано, что межгодовая динамика водоемов слабо зависит от колебаний метеорологических условий конкретного года. Статистически значимые взаимосвязи обнаружены только с длительными 24- и 36-месячными индексами засушливости SPEI, что в целом указывает на определенную устойчивость механизмов питания озерных систем в Кулунде. Несмотря на значительную разницу в площади водоемов и размерах водосборных бассейнов, Кулундинская и Плотавская озерные системы характеризуются высокой синхронностью межгодовых колебаний площадей водоемов. Относительный размах внутригодового варьирования внутри небольшой Плотавской озерной системы был существенно выше, чем в значительно большей Кулундинской системе. Определенная стабильность функционирования озерных систем Кулундинской равнины может быть связана с весьма умеренным антропогенным воздействием на питающие их водотоки в последние десятилетия: отсутствие масштабного забора воды и регулирования стока гидротехническими сооружениями.

*Ключевые слова:* озера, климатические изменения, индексы засушливости, данные дистанционного зондирования, степная зона, Кулунда, Алтайский край

DOI: 10.31857/S2587556622010046

#### ВВЕДЕНИЕ

Динамика озер и болот рассматривается в качестве возможного индикатора климатических изменений, особенно в условиях неустойчивого увлажнения. Если в гумидных регионах водно-болотные угодья, как правило, имеют достаточные ресурсы для поддержания относительно устойчивых уровней в течение года и в многолетнем режиме, то в семиаридных и аридных уровни воды подвержены значительным колебаниям: сезонным (в связи со значительным притоком воды во время весеннего снеготаяния и) и межгодовым (в зависимости от увлажненности года) (Hayashi et al., 2016).

Зависимость между динамикой уровней и климатическими изменениями ярче проявляется в пределах замкнутых озерных бассейнов, по отношению к которым предложен термин “географи-

чески изолированные ветланды” (geographically isolated wetlands) (Tiner, 2003). Такие водоемы встречаются во многих частях планеты: на Среднем Востоке, в Центральной Азии, в Северной Америке, в Австралии. В Северной Америке максимальная их концентрация наблюдается в так называемом регионе западных прерий (Prairie Pothole Region) – территории на севере Великих равнин (Leibowitz and Vining, 2003; Shaw et al., 2012).

В степной и лесостепной зонах Западной Сибири, где сосредоточено большое количество географически изолированных ветландов, наблюдается существенная неустойчивость климатических тенденций. Большинство исследований указывает на значимые положительные тренды в изменениях приземной температуры воздуха (Доклад ..., 2021;

Degefie et al., 2014; Groisman et al., 2014; Kharlamova, 2020; Sada et al., 2019; Shulgina et al., 2011). На основе данных климатического реанализа ERA Interim значения тренда оценивались в  $0.8\text{--}1.6^\circ\text{C}/10$  лет (Shulgina et al., 2011). Экстремальные температурные индексы также показывали тенденции к росту (Degefie et al., 2014). При этом тенденции в изменении осадков были не столь выражены. На большей части Сибири не наблюдалось изменений зимних осадков, тогда как летние осадки в Западной Сибири уменьшались значительно (Shulgina et al., 2011). Индексы, связанные с экстремальными осадками, оставались стабильными (Degefie et al., 2014). Однако некоторые исследования прогнозируют рост в регионе как зимних, так и осенних осадков (Sada et al., 2019). Подобная вариабельность климатических тенденций наряду с изменениями антропогенных воздействий, предположительно, могут способствовать увеличению амплитуд колебания уровня водоемов.

С 1990-х годов для мониторинга динамики озер и сопряженных с ними ландшафтов широко применяются данные дистанционного зондирования. Преимуществами дистанционных методов являются: оперативность получения количественных оценок, возможность получения информации о пространственном соотношении и взаимном расположении объектов, возможность периодической актуализации. Такой мониторинг считается важнейшим инструментом управления землепользованием и территориальным развитием (Prishchepov et al., 2012). Возможности дистанционных методов в отношении динамики аквальных ландшафтов были всесторонне рассмотрены и систематизированы в (Ozesmi and Bauer, 2002).

Современные обобщения в данной области исследований показывают, что динамика озер в семиаридных и аридных регионах регулируется сложным комплексом климатических и антропогенных факторов (Fang et al., 2018; Zhang et al., 2020). Однако единых тенденций не обнаруживается, так как в каждом конкретном случае факторы, характеризующие состояние атмосферы, преломляются местными ландшафтными условиями и спецификой хозяйственной деятельности (Argyilan and Forman, 2003; Lenters et al., 2005).

Целью данного исследования является характеристика динамики площади водной поверхности в степной зоне Алтайского края за период 1989–2020 гг. в условиях антропогенного воздействия и климатических изменений.

Задачи:

- выявление зависимости между многолетней динамикой площади водной поверхности на ключевых участках и динамикой засушливости;
- анализ синхронности/асинхронности в межгодовой динамике площади водной поверх-

ности крупной озерно-бассейновой системы и мелкой озерной системы;

- характеристика внутригодовой динамики площади водной поверхности в пределах ключевых участков.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

### *Территория исследования*

Район исследования находится на юге Западной Сибири, в пределах Кулундинской озерно-аллювиальной равнины, на границе сухой и засушливой степи. Территория Кулунды относится к области внутреннего стока, а особенности пространственно-временной организации ландшафтов тесно связаны с эволюцией озерных систем. Сформировавшиеся здесь к настоящему времени озерные и озерно-бассейновые системы являются наследием крупных озер, занимавших территорию Кулунды в прошлом (Булатов и др., 2005). Все современные озера Кулунды представляют собой типичные географически изолированные ветланды. При общности происхождения, вне зависимости от размеров, все они мелководны, что позволяет обоснованно проводить сравнительный анализ динамики их площадей.

В качестве полигонов исследования выбраны два ключевых участка в пределах одной из крупнейших озерно-бассейновых систем Кулунды – Кучукско-Кулундинской. Первый ключевой участок охватывает акваторию Кулундинского озера с низкими озерными террасами и дельту р. Кулунда. Второй участок, меньший по площади, занимает котловину с группой озер Плотавы (рис. 1).

### *Подбор и обработка данных дистанционного зондирования*

В качестве источника информации о динамике водной поверхности использовались космические снимки Landsat, достоинства которых определяются их спектральным, пространственным и временным охватом и разрешающей способностью, а также свободным доступом к соответствующей базе данных (Mikkola, 1996; Walker and Acevedo, 1987). Кроме этого, для последних четырех лет анализа привлечены космические снимки Sentinel-2. Их применение позволило не нарушать ряд анализируемых временных срезов, для которых данные Landsat были некондиционны; кроме того, использование данных двух типов позволило повысить точность классификации. Получение данных осуществлялось через Web-портал EarthExplorer Геологической службы США (USGS).

Анализируемый период включает 1989–2020 гг. При подборе данных ДЗЗ выбирались безоблачные либо с низким процентом облачности сцены,

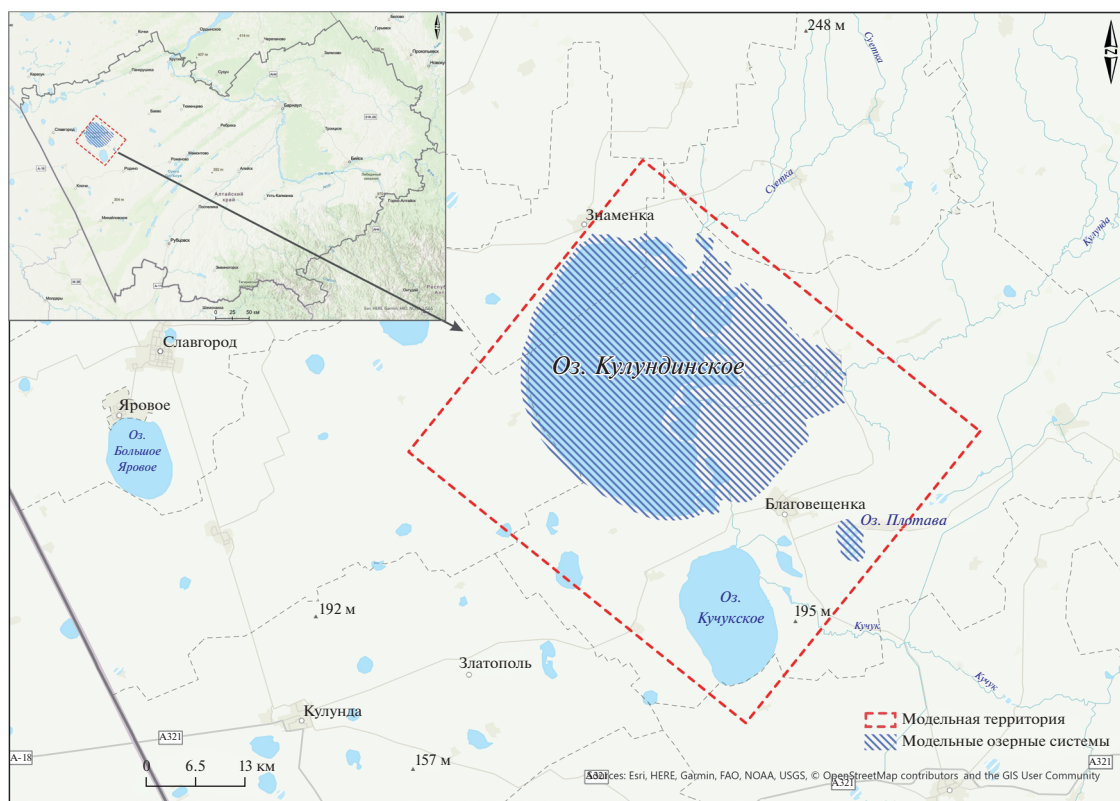


Рис. 1. Территория исследования.

покрывающие территорию исследования за весь период доступных данных. При этом из анализа были исключены несколько лет (1991–1992, 1995, 1998–1999, 2006), для которых отсутствуют кондиционные данные. Для каждого года в анализе использовалось от одного до пяти снимков, полученных в течение теплого периода (конец апреля – начало октября), когда поверхность полностью свободна от снежного покрова. Количество используемых в анализе снимков определялось качеством сцен. Таким образом была подготовлена база данных дистанционного зондирования, включающая все кондиционные снимки за период съемки в теплый период 1989–2020 гг. (табл. 1).

Территория исследования покрывается одной сценой Landsat: WRS Path/Row 150/023 и тремя сценами Sentinel-2: S2\_T43UGU, S2\_T44ULD, S2\_T44UMD. На этапе предклассификационной обработки космических снимков проводилась их радиометрическая коррекция, а также поканальное склеивание и составление бесшовных мозаик (в случае в данными Sentinel-2). Далее из полных сцен снимков вырезалась область интереса (ключевые участки), и снимки подверглись автоматизированной классификации.

Подбор оптимального алгоритма выделения водных объектов является одной из основных ме-

тодических задач. Наиболее распространенным приемом распознавания водных поверхностей служит расчет водных индексов. Для территории исследования наилучшие результаты по точности и относительной скорости получения данных показало использование модифицированного нормализованного разностного водного индекса MNDWI. Индекс предложен McFeeters (1996) и вычисляется по формуле:

$$\text{MNDWI} = (\text{Green} - \text{SWIR}) / (\text{Green} + \text{SWIR}),$$

где Green – отражение в зеленой области спектра, SWIR – отражение в средней инфракрасной области спектра.

После всех классификационных операций проводилась оценка их точности. Данная процедура является необходимым этапом для понимания объективности полученных данных. Результаты классификации в нашем случае оценивались двумя способами: по матрице ошибок и построению линейных профилей вода–суша (Congalton and Green, 2009).

#### *Анализ динамики и расчет индексов засушливости*

Для расчетов индексов засушливости были использованы данные метеостанций Славгород и Камень-на-Оби, доступные из открытых источ-

**Таблица 1.** Структура каталога данных космических снимков для территории исследования

1989 г.	1990 г.	1991 г.	1992 г.	1993 г.	1994 г.	1995 г.	1996 г.	1997 г.	1998 г.	1999 г.
L5_12.09	L5_24.04 L5_30.08	–	–	L5_19.06 L5_06.08	L5_05.05 L5_06.06	–	L5_17.10	L5_06.10	–	–
2000 г.	2001 г.	2002 г.	2003 г.	2004 г.	2005 г.	2006 г.	2007 г.	2008 г.	2009 г.	–
–	L7_03.07 L7_04.08	L7_19.05 L7_23.08	L7_26.08 L7_13.10	L7_09.06 L7_28.08	L7_11.05 L7_16.09	–	L5_26.06 L5_29.08	L5_30.07 L5_02.10	L5_30.05 L7_09.07 L5_18.08 L5_19.09	–
2010 г.	2011 г.	2012 г.	2013 г.	2014 г.	2015 г.	2016 г.	2017 г.	2018 г.	2019 г.	2020 г.
L7_09.05 L5_04.07 L5_22.09	L5_20.05 L7_16.08 L7_17.09	L7_30.05	L7_17.05 L8_12.07 L8_30.09	L7_04.05 L8_15.07 L7_24.08	L7_07.05 L7_24.06 L8_19.08	L8_01.05 L7_25.05 L8_05.08 L8_06.09	L7_26.04 S2_26.05 L8_07.07 L8_09.09 S2_13.10	S2_08.06 L8_10.07 S2_24.08 L8_28.09 S2_26.10	L8_10.05 L8_13.07 S2_04.08 L8_15.09 L7_09.10	L8_12.05 L8_15.07 L8_03.10

**Таблица 2.** Режим увлажнения и значения индекса SPEI (Svoboda et al., 2012)

Режим увлажнения	Значения SPEI
Экстремально влажно	$\geq 2.0$
Очень влажно	1.5–1.99
Умеренно влажно	1.0–1.49
Близко к норме	от –0.99 до –0.99
Умеренно сухо	от 1.0 до –1.49
Сильно сухо	от –1.5 до –1.99
Экстремально сухо	$\leq -2.0$

ников<sup>1</sup>. Выбор метеостанций обусловлен как доступностью данных по основным параметрам (температуры воздуха, суммы атмосферных осадков, характеристики снежного покрова), так и расположением относительно исследуемых озерных систем. Метеостанция Славгород расположена в непосредственной близости от исследуемых водоемов (до Кулундинского озера 48 км) и характеризует климат подзоны сухой степи. Однако обширный бассейн оз. Кулундинского расположен восточнее самого озера, в степной и лесостепной зонах. Метеостанция Камень-на-Оби (подзона южной лесостепи) является единственной из доступных метеостанций, близких к верховьям и центральной части бассейна р. Кулунды и Кулундинского озера. В анализе и расчетах использовались массивы данных среднесуточных температур воздуха и сумм осадков, а также данные маршрутных снегомерных съемок за период с 1970 по 2020 г.

<sup>1</sup> Всероссийский НИИ гидрометеорологической информации. <http://www.meteo.ru> (дата обращения 10.06.2021).

Для оценки продолжительности и интенсивности засушливых периодов в работе был использован индекс SPEI (Standardised Precipitation Evapotranspiration Index) (Vicente-Serrano et al., 2010). Расчет SPEI основан на среднемесячных данных об атмосферных осадках и температуре воздуха. Преимуществом этого индекса (например, над индексом SPI – Standard Precipitation Index) является возможность учета изменчивости температур воздуха при оценке засух. Значения SPEI можно интерпретировать как количество стандартных отклонений, на которые наблюдаемая аномалия отклоняется от среднего многолетнего значения за выбранный период времени.

Мы рассчитывали SPEI для 1-, 3-, 6-, 8-, 12-, 24-, 36-месячных периодов. Индексы, рассчитанные для периода до 3-х месяцев, используются для выявления кратковременных аномалий во влажности почв, количестве снежного покрова, стока на небольших водосборах, период до 12-ти месяцев – для среднесрочного мониторинга засух одного вегетационного периода, долгосрочные индексы (до 48 мес.) – для выявления долговременных аномалий, сопровождающихся, как правило, существенным снижением уровня грунтовых вод, уменьшением речного стока и другими последствиями. Стандартная градация режимов увлажнения по индексу SPEI (совпадает с SPI) представлена в табл. 2. При расчете индекса также рассчитывается параметр потенциальной эвапотранспирации (PET), который вычислялся по методу Торнтуэйта (Thornthwaite, 1948). Расчет индекса производился с помощью библиотеки SPEI в R (Beguería et al., 2014; Vicente-Serrano et al., 2010).



*Анализ данных*

Учитывая большие различия в абсолютных значениях площадей водоемов между Кулундинским и Плотавским участками, в процессе анализа мы использовали как абсолютные значения, так и стандартизированные значения площадей водной поверхности. Стандартизированные значения ( $z$ -score) рассчитывались как отклонения площадей водной поверхности от среднего значения, нормированные на стандартное отклонение ( $\sigma$ ) по ряду наблюдений.

Для оценки связей между максимальными за год площадями водной поверхности, индексами SPEI и максимальными снегозапасами использовался ранговый коэффициент корреляции Спирмена. Максимальные за зиму снегозапасы выступали как индикатор снежности зимних периодов. Коэффициент корреляции Спирмена также рассчитывался между значениями площадей водоемов на Кулундинском и Плотавском участках на одни и те же даты съемки. Расчет корреляции производился для оценки связи между колебаниями площадей водоемов в двух озерных системах. Выбор непараметрических методов оценки обусловлен значимыми отклонениями рядов наблюдений от нормального распределения (по тесту Шапиро—Уилка), прежде всего по Плотавскому участку.

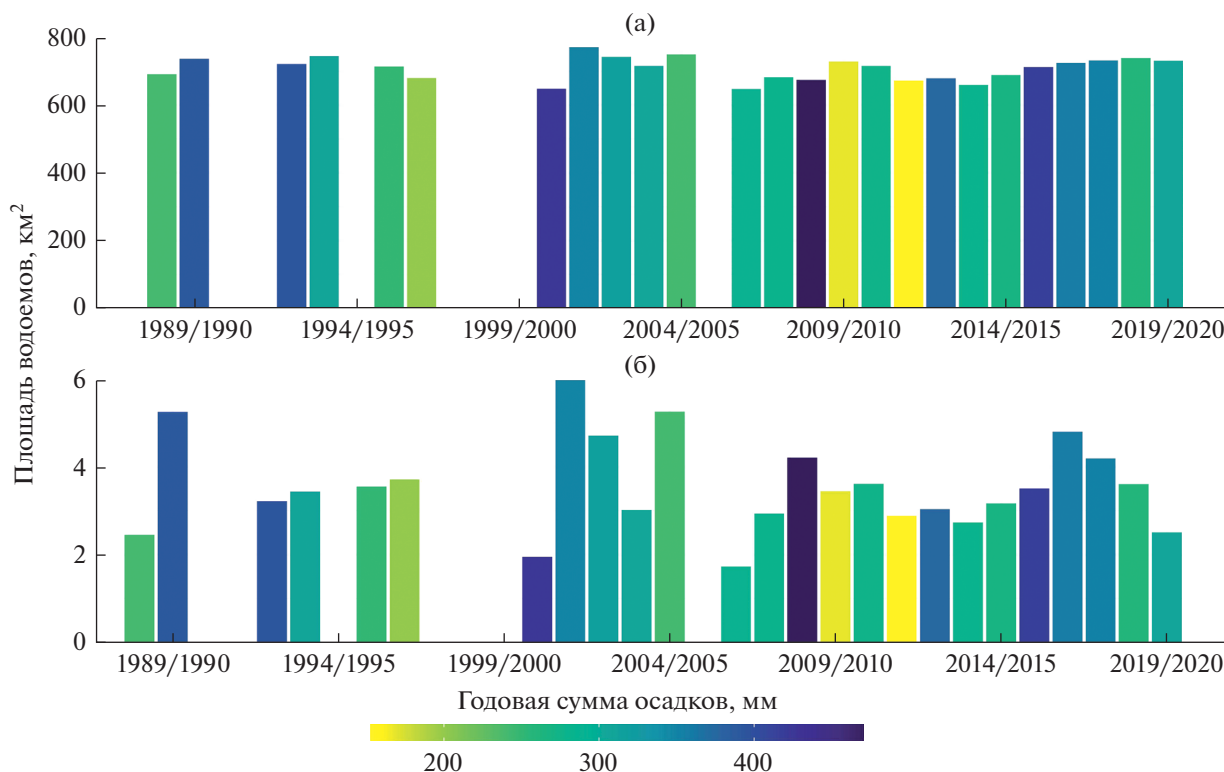
Наличие многолетних тенденций в динамике площадей водной поверхности и климатических данных (температуры, осадки и максимальные снегозапасы) оценивалось с помощью непараметрического теста Манна—Кендалла (с поправкой на автокоррелированность и сезонность для климатических переменных). Перед проведением расчетов ряды данных были проверены на однородность и стационарность с помощью  $t$ -теста (по среднему значению),  $F$ -теста (по дисперсии) и расширенного теста Дики—Фуллера. Для расчетов  $t$ - и  $F$ -статистик ряды данных были разделены на две относительно равные части. Для оценки тенденций динамики водной поверхности использовались непрерывные ряды данных, начиная с 2008 г. По большинству критериев ряды были близки к однородным и стационарным (при  $\alpha = 5\%$ ). Однако определенные признаки неоднородности наблюдались по ряду годовых сумм осадков и среднегодовых температур по метеостанции Славгород (по  $t$ -тесту) и максимальных площадей водной поверхности на Кулундинском участке (по тесту Дики—Фуллера). Все расчеты и анализ данных производились в среде R.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

*Многолетняя динамика площади водной поверхности и ее связь с засушливыми и влажными периодами*

Площади водной поверхности в пределах Кулундинского и Плотавского участков не показывают каких-либо тенденций к последовательному сокращению (рис. 2). Более того, с 2008 г. на Кулундинском участке отмечен слабый, но статистически значимый тренд увеличения площадей водной поверхности ( $M-K z = 2.01$ ,  $p$ -value = 0.04408) величиной около 5.02 км<sup>2</sup>/год. Подобная динамика контрастирует с другими внутриконтинентальными бассейнами, где нередко наблюдается усыхание водоемов. В Северо-Западном Китае площадь водоемов в густонаселенных районах сократилась на 40% с 2000 г. (Fang et al., 2018), а крупнейшее озеро Эби-Нур — более чем вдвое (Zhang et al., 2020). Во всей Центральной Азии с 2000 г. наблюдалось сокращение как максимальных за год, так и минимальных площадей водоемов, но скорость сокращения максимумов была вдвое выше (Che et al., 2019). Часть крупных озер в Центральной Азии показывает вполне стабильную динамику, например, оз. Алаколь и Саякколь изменялись в пределах 1% от своей площади (Bai et al., 2011). В основном такие тенденции в аридных регионах обусловлены антропогенным воздействием, включающим в себя масштабный забор воды на ирригацию и иные нужды (Fang et al., 2018; Sillio-Calzada et al., 2017; Zhang et al., 2020). Другими словами, климатические причины не играют роль единственного деструктивного фактора, хотя и могут существенно усиливать негативное воздействие. На Кулундинской равнине антропогенное воздействие на водотоки, питающие озера, достаточно умеренное, что может обуславливать относительную стабильность уровней воды. Ирригационное земледелие находится в кризисе (Орлова, 2011), количество и работоспособность гидротехнических сооружений (прудов) в регионе снижается (Губарев и др., 2017), соответственно снижается и зарегулированность стока рек, питающих озера.

Динамика климатических параметров за период исследования (с 1970 г.) по метеостанциям Славгород и Камень-на-Оби была близка к ранее отмеченным тенденциям (Kharlamova, 2020; Shulgina et al., 2011). Среднегодовые температуры воздуха имели значимые тенденции к росту на обеих метеостанциях (Славгород:  $M-K z = 3.1$ ,  $p$ -value = 0.002258; Камень-на-Оби:  $M-K z = 2.7$ ,  $p$ -value = 0.006671) примерно на 0.3°C/10 лет. Максимальные снегозапасы и годовые суммы осадков в основном оставались стабильными, кроме сумм осадков по метеостанции Славгород. Здесь был отмечен слабый тренд ( $M-K z = -2.1439$ ,  $p$ -value = 0.03204) снижения сумм осадков на 10.4 мм/10 лет.



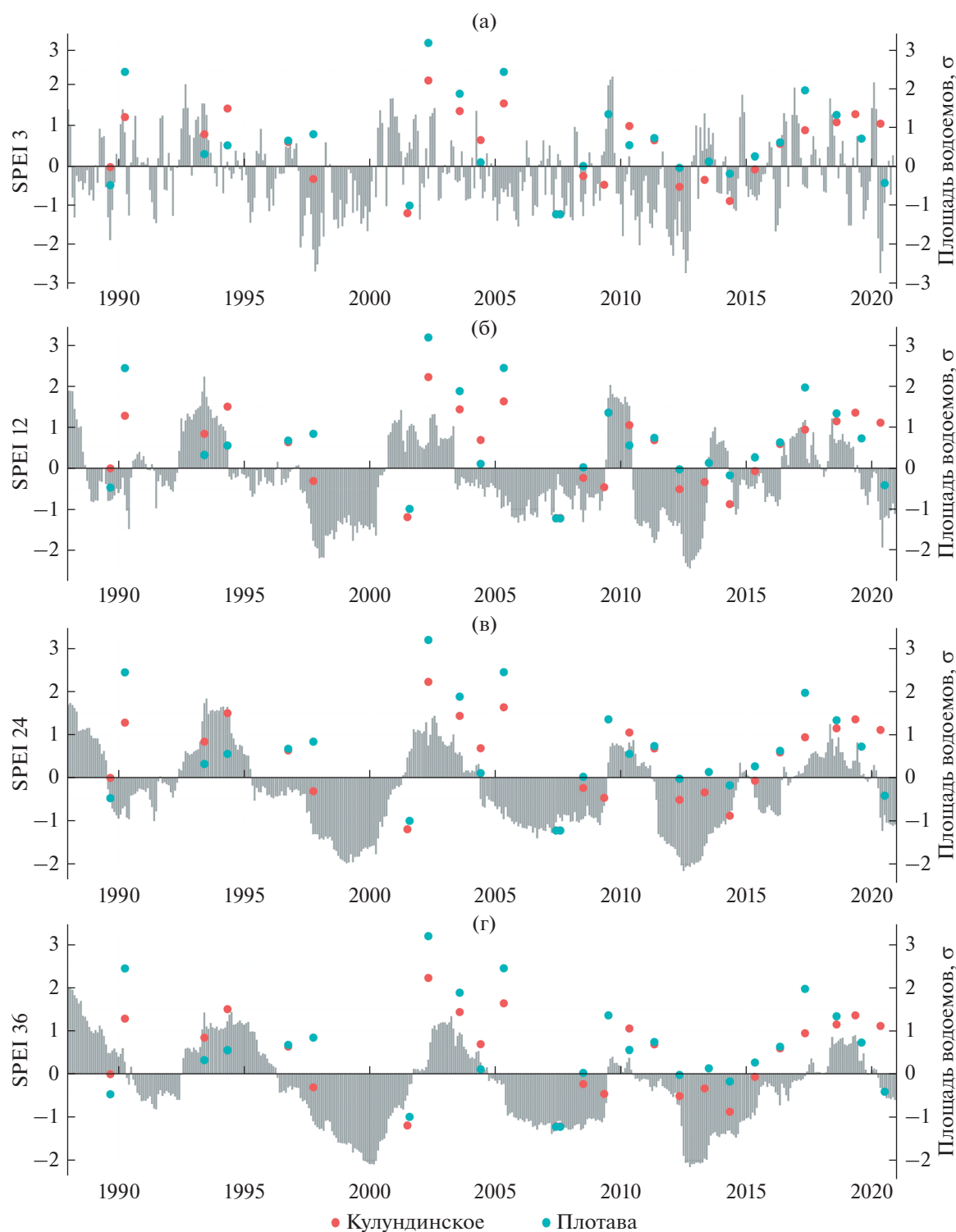
**Рис. 2.** Максимальные площади водоемов Кулундинской (а) и Плотавской (б) систем озер и суммы осадков за гидрологический год по метеостанции Славгород.

Суммы атмосферных осадков каждого конкретного года слабо влияют на площади водной поверхности (см. рис. 2 и цветовую шкалу по количеству осадков). Большие площади водоемов могут наблюдаться в годы с малым атмосферным увлажнением. Как пример можно привести 2010 и 2005 гг. на Кулундинском участке. Также на Кулундинском участке наиболее ярко проявляется определенное запаздывание реакции водоемов на изменения атмосферного увлажнения. Наиболее высокие значения площадей водоемов отмечены спустя 2–3 года после влажных лет, либо серий влажных лет. Эта тенденция хорошо иллюстрируется 24- и 36-месячными индексами SPEI (рис. 3в, г). Таковыми были практически все пиковые по площадям водоемов годы – 1994, 2002, 2005, 2019. Достаточно высокие значения площадей водоемов в 2010 г. наблюдались вообще на фоне аномально сухого года (менее 200 мм осадков). Данная закономерность работает и в обратном направлении. Достаточно влажные годы (например, 2001) могли сопровождаться низкими значениями площадей водоемов. Однако таким годам, как правило, предшествовали достаточно сухие периоды в 1–3 года (например, 1997–1999 гг.).

На значительно меньшем по площади Плотавском участке определенная инерционность реакций на изменения атмосферного увлажнения

также прослеживается (см. рис. 3). Кроме этого, многие другие пиковые годы также совпадают с таковыми на Кулундинском участке (1990, 2002, 2005). Определенные отличия отмечались лишь в последние годы, когда на Кулундинском участке наблюдалась тенденция к увеличению покрытых водой площадей, тогда как на Плотавском участке это отмечалось ранее – в 2017 г.

Рассмотренные выше закономерности подтверждаются корреляционным анализом (табл. 3). Статистически значимые коэффициенты корреляции площадей водной поверхности были отмечены только с долгосрочными 24- и 36-месячными индексами SPEI и только для Кулундинского участка. Кроме этого, значения коэффициентов корреляции были выше для индексов, рассчитанных по метеостанции Славгород. Возможно, свою роль сыграло расположение метеостанции Камень-на-Оби в долине р. Обь. Тем не менее общее направление усиления связи сохранялось (от краткосрочных к долгосрочным SPEI). Несмотря на низкие и статистически незначимые коэффициенты корреляции для Плотавского участка, значения коэффициентов там также увеличивались в сторону долгосрочных индексов SPEI. Значения максимальных снегозапасов для всех участков и метеостанций имели незначимые коэффициенты корреляции с изменениями площади водоемов.



**Рис. 3.** Значения 3- (а), 12- (б), 24- (в), 36-месячных (г) индексов SPEI и стандартизированные (в единицах стандартного отклонения,  $\sigma$ ) площади водоемов. SPEI приводится по метеостанции Славгород.

Водоемы как Кулундинского, так и Плотавского участков гораздо активнее реагировали на влажные периоды в сравнении с засушливыми. За период с 1989 по 2020 г. в регионе отмечено три про-

должительных засушливых периода (см. рис. 3б). Сильные и даже экстремальные засухи наблюдались в 1997–2000 и 2011–2014 гг. (SPEI 12 до  $-2.4$ ). Умеренно засушливый период был в 2004–2009 гг.

**Таблица 3.** Значения коэффициентов корреляции Спирмена\*, рассчитанные между значениями максимальных за год площадей водоемов, значениями индексов SPEI за 1-, 3-, 4-, 6-, 8-, 12-, 24-, 36-месячные периоды и величинами максимальных снегозапасов (SWE)

Озерная система	SPEI 1	SPEI 3	SPEI 4	SPEI 6	SPEI 8	SPEI 12	SPEI 24	SPEI 36	SWE
Метеостанция Камень-на-Оби									
Кулундинское	−0.42	−0.14	−0.15	−0.12	−0.16	0.03	0.39	<b>0.59</b>	−0.29
Плотава	−0.33	0.01	0.06	0.14	0.09	0.37	0.13	0.47	−0.10
Метеостанция Славгород									
Кулундинское	−0.18	0.11	0.20	0.23	0.25	0.35	<b>0.63</b>	<b>0.77</b>	0.04
Плотава	−0.15	0.16	0.27	0.29	0.33	0.27	0.43	0.48	−0.02

\* Полужирным шрифтом выделены значения коэффициентов корреляции значимые при  $p < 0.05$ . Уровень значимости оценивался с учетом поправки на множественные сравнения по методу Холма—Бонферрони, без учета поправки число значимых связей было больше.

(SPEI 12 до −1.3). Несмотря на сильные и достаточно продолжительные засухи, стандартизированные площади водоемов не опускались ниже −1.2 (2001 и 2007 гг.). Даже в самый экстремальный засушливый период 2011–2014 гг. площади водоемов Кулундинского участка составляли от −0.5 до −0.8  $\sigma$ . На Пловатском участке стандартизированные площади водной поверхности и вовсе были близки к средним в диапазоне −0.17...−0.13  $\sigma$ . В то же время даже в весьма умеренные влажные периоды, как, например, в 2000–2003 гг. (SPEI 12 до 1.4), отмечалось увеличение площадей вплоть до 2.2  $\sigma$  на Кулундинском участке и 3.1  $\sigma$  на Пловатском в 2002 г. Подобная реакция наблюдалась и в последние годы, когда умеренный влажный период 2016–2019 гг. сопровождался увеличением площадей до 1.3–1.9  $\sigma$ . Для находящегося севернее бессточного озера Чаны делалось предположение (Обзор ..., 2015), что в многоводные годы происходит уменьшение количества бессточных понижений в бассейне озера и избытки воды поступают в конечный водоем, тогда как в маловодные — площадь бессточных понижений увеличивается, а потери влаги на испарение и фильтрацию возрастают.

*Синхронность и асинхронность межгодовых колебаний Кулундинской и Пловатской озерных систем*

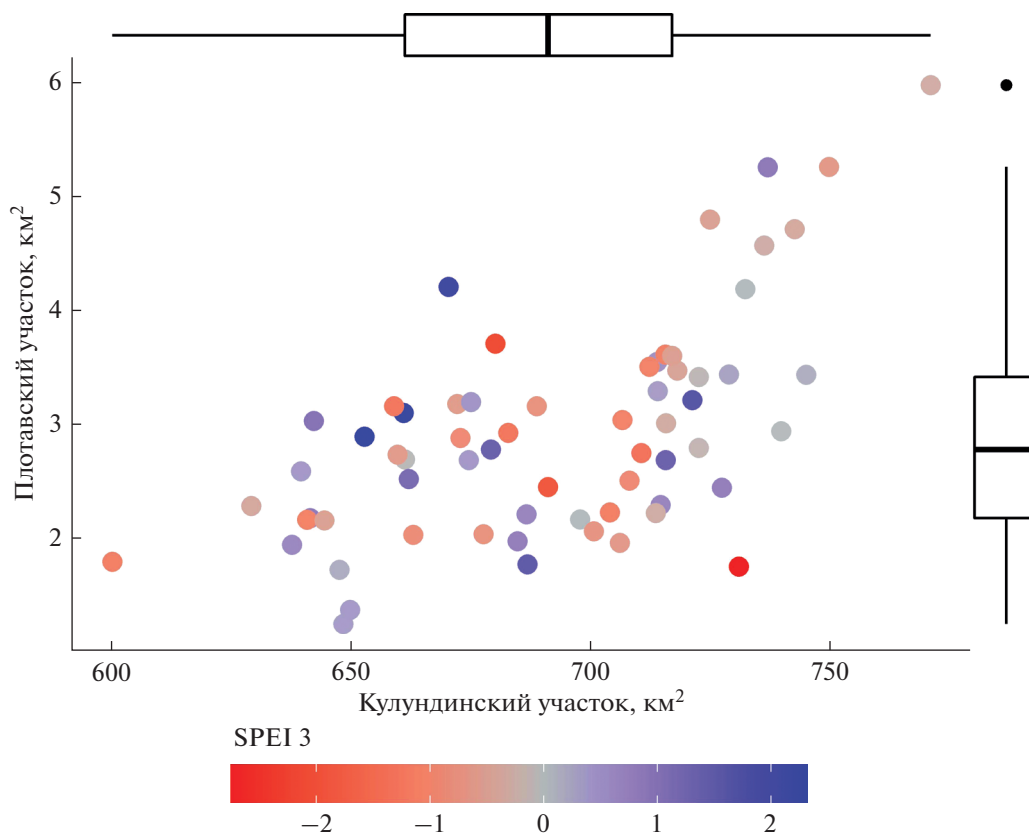
Несмотря на разницу в размерах Кулундинской и Пловатской озерных систем, площади водоемов изменялись во времени достаточно синхронно. Коэффициент корреляции Спирмена между площадями водоемов на одни и те же даты наблюдений составил 0.58 (значим при  $p < 0.001$ ). Кроме этого, практически не наблюдалось каких-то взаимосвязей с кратковременными влажными или сухими периодами, выраженными через 3-месячный индекс SPEI (рис. 4). Ожидалось, что небольшая Пловатская озерная система будет острее реагировать на кратковременные колеба-

ния увлажнения, а площади водоемов Кулундинской системы будут оставаться стабильными. Однако примеров таких реакций немного. Например, в экстремально засушливом мае 2020 г. (SPEI 3–2.7) площадь водоемов Пловатского участка была меньше 2 км<sup>2</sup>, тогда как площадь Кулундинской системы в 730.7 км<sup>2</sup> была даже выше медианной (см. рис. 3 и 4). Противоположная ситуация наблюдалась во влажный 2009 г. (SPEI 3 2.1–2.3), когда площадь озер Кулундинской системы была меньше 670 км<sup>2</sup>, а Пловатской — составляла от 2.9 до 4.2 км<sup>2</sup>. В целом же отмеченные примеры можно рассматривать как исключения из общей синхронности колебаний площадей водоемов двух озерных систем.

Диапазон межгодового варьирования Пловатской озерной системы (в относительных величинах) был существенно выше, чем у Кулундинской (см. рис. 2). Если размах варьирования площадей водной поверхности на Кулундинском участке был 171 км<sup>2</sup> (в пределах 25% от средней площади), то для Пловатской системы этот показатель составлял 4.7 км<sup>2</sup>, или 163% от средней площади водоемов системы. Коэффициент вариации при этом для Кулундинской системы составил 5.2% а для Пловатской — 33.2%. Значительное варьирование весьма характерно для подобных замкнутых понижений (Hayashi et al., 2016).

*Внутригодовая динамика площади водоемов*

Для исследуемых водоемов прослеживается достаточно четкий режим внутригодовой изменчивости площадей: с максимальными значениями в мае (после весеннего половодья) и постепенным снижением в течение летне-осенней межени. Максимальные уровни наблюдались только в трех месяцах в году: мае, июле и августе (рис. 5). Для Кулундинской системы май чаще всего являлся пиковым месяцем. Из этой закономерности выбивается лишь 2018 г., когда максимальные



**Рис. 4.** Взаимосвязь площадей водоемов Кулундинского и Плотавского участков на один и тот же срок наблюдений. Цветом показаны значения 3-х месячного индекса SPEI. Диаграммой “ящик с усами” показаны распределения площадей водоемов, нижний и верхний края “ящика” обозначают первый и третий квартили соответственно, центральная линия обозначает медиану, “усы” соответствуют максимальному значению, но не более полутора межквартильных размахов; измерения, выходящие за данный интервал отмечены как выбросы (черные точки).

площади были зафиксированы в августе, а с июня происходил их постепенный рост. Пиковые значения августа 2018 г., скорее всего, связаны с переходом от длительного сухого к влажному периоду, который хорошо выражен через 12- и 24-месячные индексы SPEI (см. рис. 36, в). На Плотавском участке внутригодовая динамика площадей водоемов до 2017 г. также в целом следовала закономерности по снижению площадей от мая к октябрю. В последние же годы (2017–2020) наблюдалась существенная нестабильность. Максимальные площади сдвинулись на июль и август. Площади водоемов могли отличаться на несколько квадратных километров даже между соседними месяцами (например, в 2017 и 2018 гг.). Скорее всего, это также связано с переходом от неустойчивого влажного к сухому периоду, когда водоемы резко реагируют на какие-либо кратковременные метеорологические события.

В относительных величинах внутригодовой размах варьирования площадей водоемов на Плотавском участке был выше такового в пределах Кулундинского участка. В среднем в пределах одного года размах варьирования составлял 1.1 км<sup>2</sup>

(39% от средней площади) на Плотавском участке и 45.8 км<sup>2</sup> (6.6%) на Кулундинском. Среднегодовой коэффициент вариации площадей водоемов на Кулундинском участке также был существенно ниже (3.7%), чем на Плотавском (20.4%). После 2017 г. внутригодовой размах варьирования площадей водоемов на Кулундинском участке снижался (коэффициент вариации после 2017 г. 2.0%) (см. рис. 5). Другими словами, площади водоемов были стабильно высокими с мая по октябрь. На Плотавском участке с 2017 по 2019 г. варьирование, наоборот, увеличивалось. Размах варьирования площадей вырос до 2 км<sup>2</sup>, а коэффициент вариации до 26.7%.

Увеличение площадей водоемов и стабильно высокие уровни с 2018 по 2020 г. на Кулундинском участке соотносятся со схожими тенденциями на соседнем Приобском плато. Там увеличение площадей водоемов было по настоящему экстремальным (до 3  $\sigma$  в стандартизированных величинах) и превысило значения за весь доступный период наблюдений (Черных и др., 2020). На Кулундинской равнине рост был вполне в пределах многолетнего размаха изменчивости, однако не

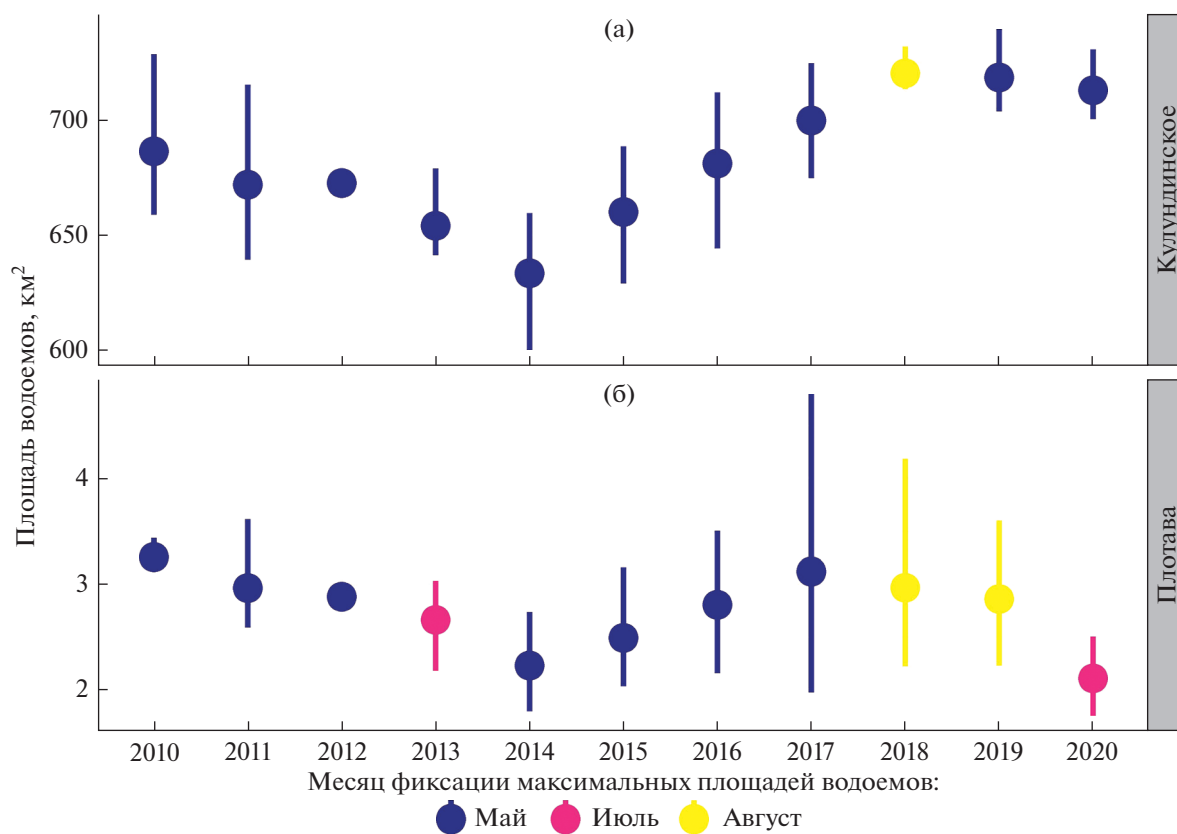


Рис. 5. Средние значения и размах варьирования площадей водоемов Кулундинского (а) и Плотавского (б) участков за 2010–2020 гг.

вполне объясним с точки зрения гидротермических показателей (происходил на фоне умеренного периода после засухи 2011–2014 гг.).

## ВЫВОДЫ

Анализ динамики площадей водоемов в двух бессточных озерных системах Кулундинской равнины, проведенный на основе данных дистанционного зондирования за период 1989–2020 гг., показал отсутствие тенденций к направленному сокращению площадей водоемов. Несмотря на наличие нескольких сильных засух за последние 30 лет, водоемы Кулундинской и Плотавской озерных систем не испытывали каких-либо чрезвычайно резких сокращений площадей водной поверхности.

Выявлено, что межгодовая динамика водоемов слабо зависит от колебаний метеорологических условий конкретного года. Статистически значимые взаимосвязи обнаружены только с длительными 24- и 36-месячными индексами засушливости SPEI, что в целом указывает на определенную устойчивость механизмов питания озерных систем в Кулунде.

Кулундинская и Плотавская озерные системы показывали высокую синхронность межгодовых

колебаний площадей водоемов, несмотря на значительную разницу в площади водоемов и размерах водосборных бассейнов. Относительный размах внутригодового варьирования внутри небольшой Плотавской озерной системы был существенно выше, чем в значительно большей Кулундинской системе. Определенная стабильность функционирования озерных систем Кулундинской равнины может быть связана с весьма умеренным антропогенным воздействием на питающие их водотоки в последние десятилетия: отсутствие масштабного забора воды и регулирования стока гидротехническими сооружениями.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ

Анализ метеоусловий и расчет индексов засушливости выполнен в рамках государственного задания (номер госрегистрации 1021032422891-7), дешифрирование данных дистанционного зондирования и их анализ выполнен при финансовой поддержке РФФИ, проект № 18-45-220001 p\_a.

## FUNDING

The meteorological fluctuations analysis and calculation of drought indices were carried out within the state

project no. 1021032422891-7. Remote sensing data analysis was funded by RFBR, project no. 18-45-220001 p\_a.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Булатов В.И., Ротанова И.Н., Черных Д.В. Ландшафтно-экологический и картографический анализ озерно-бассейновых систем юга Западной Сибири (озера Чаны и Кулундинское) // Сиб. экол. журн. 2005. № 2. С. 175–182.
- Губарев М.С., Рыбкина И.Д., Стоящева Н.В. Инвентаризация состояния прудов на притоках реки Алей в степной зоне Алтайского края // Вестн. Алтайского гос. аграрного ун-та. 2017. № 6 (152). С 61–68.
- Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2020 год. М.: Росгидромет, 2021. 104 с.
- Обзор экологического состояния озера Чаны (Западная Сибирь) / отв. ред. О.Ф. Васильев, Я. Вейн. Новосибирск: Академическое изд-во “Гео”, 2015. 255 с.
- Орлова И.В. Проблемы развития ирригации в Алтайском крае и вопросы ее экологической безопасности // Ползуновский вестн. 2011. № 4–2. С. 93–97.
- Черных Д.В., Золотов Д.В., Бирюков Р.Ю., Першин Д.К. Пространственно-временная динамика аквальных и сопряженных с ними геосистем на юге Западной Сибири в условиях климатических изменений: Матер. науч. конф. Деградация земель и опустынивание: проблемы устойчивого природопользования и адаптации. М., 2020. С. 135–140. <https://doi.org/10.29003/m1694.978-5-317-06490-7/135-140>
- Argyilan E.P., Forman S.L. Lake level response to seasonal climatic variability in the Lake Michigan–Huron system from 1920 to 1995 // J. Great Lakes Res. 2003. Vol. 29. P. 488–500. [https://doi.org/10.1016/S0380-1330\(03\)70453-5](https://doi.org/10.1016/S0380-1330(03)70453-5)
- Bai J., Chen X., Li J., Yang L., Fang H. Changes in the area of inland lakes in arid regions of central Asia during the past 30 years // Environ. Monitoring and Assessment. 2010. Vol. 178. Iss. 1. P. 247–256. <https://doi.org/10.1007/S10661-010-1686-Y>
- Beguéria S., Vicente-Serrano S.M., Reig F., Latorre B. Standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) revisited: parameter fitting, evapotranspiration models, tools, datasets and drought monitoring // Int. J. Climatol. 2014. Vol. 34. Iss. 10. P. 3001–3023. <https://doi.org/10.1002/joc.3887>
- Che X., Feng M., Sexton J., Channan S., Sun Q., Ying Q., Wang Y. Landsat-Based Estimation of Seasonal Water Cover and Change in Arid and Semi-Arid Central Asia (2000–2015) // Remote Sens. 2019. Vol. 11. P. 1323. <https://doi.org/10.3390/RS11111323>
- Congalton R., Green K. Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data: Principles and Practices. 2nd Ed. Boca Raton: CRC/Taylor & Francis, 2009. 183 p.
- Degefie D.T., Fleischer E., Klemm O., Soromotina A.V., Soromotina O.V., Tolstikov A.V., Abramov N.V. Climate extremes in South Western Siberia: past and future // Stoch. Environ. Res. Risk Assess. 2014. Vol. 28. P. 2161–2173. <https://doi.org/10.1007/s00477-014-0872-9>
- Fang L., Tao S., Zhu J., Liu Y. Impacts of climate change and irrigation on lakes in arid northwest China // J. Arid Environ. 2018. Vol. 154. P. 34–39. <https://doi.org/10.1016/J.JARIDENV.2018.03.008>
- Groisman P.Ya., Blyakharchuk T.A., Chernokulsky A.V., et al. Climate changes in Siberia // Reg. Environ. Changes in Siberia and Their Global Consequences / Groisman P.Ya., Gutman G. (Eds.). Dordrecht: Springer Environmental Science and Engineering, 2013. P. 57–109. [https://doi.org/10.1007/978-94-007-4569-8\\_3](https://doi.org/10.1007/978-94-007-4569-8_3)
- Hayashi M., van der Kamp G., Rosenberry D.O. Hydrology of Prairie Wetlands: Understanding the Integrated Surface-Water and Groundwater Processes // Wetland. 2016. Vol. 36. P. 237–254. <https://doi.org/10.1007/s13157-016-0797-9>
- Kharlamova N.F. Climatic Variability of the Kulunda Steppe // KULUNDA: Climate Smart Agriculture. South Siberian Agro-steppe as Pioneering Region for Sustainable Land Use / Frühauf M., Guggenberger G., Meinel T., Theesfeld I., Lentz S. (Eds.). Springer Int. Publ., 2020. P. 19–32. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-15927-6>
- Leibowitz S.G., Vining K.C. Temporal connectivity in a prairie pothole complex // Wetlands. 2003. Vol. 23. Iss. 1. P. 13–25. [https://doi.org/10.1672/0277-5212\(2003\)023\[0013:TCIAPP\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1672/0277-5212(2003)023[0013:TCIAPP]2.0.CO;2)
- Lenters J.D., Kratz T.K., Bowser C.J. Effects of climate variability on lake evaporation: Results from a longterm energy budget study of Sparkling Lake, northern Wisconsin (USA) // J. Hydrol. 2005. Vol. 308. P. 168–195. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.10.028>
- McFeeters S.K. The use of normalized difference water index (NDWI) in the delineation of open water features // Int. J. Remote Sens. 1996. Vol. 17. P. 1425–1432. <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>
- Mikkola K. A remote sensing analysis of vegetation damage around metal smelters in the Kola Peninsula, Russia // Int. J. Remote Sens. 1996. Vol. 17. P. 3675–3690. <https://doi.org/10.1080/01431169608949177>
- Ozesmi S.L., Bauer M.E. Satellite remote sensing of wetlands // Wetl. Ecol. Manag. 2002. Vol. 10. Iss. 5. P. 381–402. <https://doi.org/10.1023/A:1020908432489>
- Prishchepov A.V., Radeloff V.C., Baumann M., Kuemmerle T., Müller D. Effects of institutional changes on land use: agricultural land abandonment during the transition from state-command to market-driven economies in post-Soviet Eastern Europe // Environ. Res. Lett. 2012. Vol. 7. P. 1–13. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/2/024021>
- Sada R., Schmalz B., Kiesel J., Fohrer N. Projected changes in climate and hydrological regimes of the Western Siberian lowlands // Environ. Earth Sci. 2019. Vol. 78. Iss. 2. P. 1–15. <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8047-0>
- Shaw D.A., van der Kamp G., Conly F.M., Pietroniro A., Martz L. The fill-and-spill hydrology of prairie wetland complexes during drought and deluge // Hydrol. Processes. 2012. Vol. 26. P. 3147–3156. <https://doi.org/10.1002/hyp.8390>

- Shulgina T.M., Genina E.Yu., Gordov E.P.* Dynamics of climatic characteristics influencing vegetation in Siberia // *Environ. Res. Lett.* 2011. Vol. 6. № 4. P. 1–7. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/6/4/045210>
- Silio-Calzada A., Barquín J., Huszar V.L.M., Mazzeo N., Méndez F., Álvarez-Martínez J.M.* Long-term dynamics of a floodplain shallow lake in the Pantanal wetland: Is it all about climate? // *Sci. of The Total Environ.* 2017. Vol. 605–606. P. 527–540. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2017.06.183>
- Svoboda M., Hayes M., Wood D.* Standardized Precipitation Index User Guide. Geneva: World Meteorological Organization, 2012. 24 p.
- Thorntwaite C.W.* An approach toward a rational classification of climate // *Geograph. Rev.* 1948. Vol. 38. P. 55–94. <https://doi.org/10.2307/2107309>
- Tiner R.W.* Geographically isolated wetlands of the United States // *Wetlands.* 2003. Vol. 23. Iss. 3. P. 494–516. [https://doi.org/10.1672/0277-5212\(2003\)023\[0494:GIWOTU\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1672/0277-5212(2003)023[0494:GIWOTU]2.0.CO;2)
- Vicente-Serrano S.M., Beguería S., López-Moreno J.I.* A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index // *J. Climate.* 2010. Vol. 23. Iss. 7. P. 1696–1718. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1>
- Walker D.A., Acevedo W.* Vegetation and a Landsat-derived land cover map of the Beechey Point Quadrangle, Arctic Coastal Plain, Alaska. Hanover, NH: U.S. Army Cold Regions Engineering and Research Laboratory, CRREL Report 87–5, 1987. 63 p.
- Zhang J., Ding J., Wu P., Tan J., Huang S., Teng D., Chen W.* Assessing arid Inland Lake Watershed Area and Vegetation Response to Multiple Temporal Scales of Drought Across the Ebinur Lake Watershed // *Sci. Reports.* 2020. Vol. 10. Iss. 1. P. 1–17. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-57898-8>

## Dynamic Changes of the Steppe Zone Lakes in Altai Krai under Anthropogenic Impacts and Climate Change

D. V. Chernykh<sup>1</sup>\*, R. Yu. Biryukov<sup>1</sup>, and D. K. Pershin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Institute for Water and Environmental Problems, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Barnaul, Russia*  
\*e-mail: [chernykh@mail.ru](mailto:chernykh@mail.ru)

Multiscale relict lakes are the essential elements of the steppe plains in Altai krai in Russia (South Siberia). Based on the remote sensing data (Landsat and Sentinel-2 images), we analyzed the water bodies' area dynamics in the two endorheic lake systems of the Kulunda Steppe—Kulunda and Plotava. We found no evident tendency to reduce water bodies' area between 1989 and 2020. Despite several severe droughts during the last 30 years, water bodies of Kulunda and Plotava lake systems have not experienced any extremely sharp reductions. The SPEI index was used to estimate the duration and intensity of droughts. It was shown that the inter-annual dynamics of lakes weakly depend on weather fluctuations of a particular year. Statistically significant correlations were found only with 24- and 36-month SPEI indices, which generally indicated the relative stability of feeding mechanisms of lake systems in Kulunda Steppe. Despite the significant difference in catchments and lake areas, the Kulunda and Plotava lake systems were characterized by high synchrony of inter-annual fluctuations. The relative range of intra-annual variation within the small Plotava lake system was significantly higher than in the much larger Kulunda system. Stability in the functioning of the Kulunda lake systems may be related to a very moderate human impact on the feeding watercourses in recent decades. There was the absence of large-scale water withdrawal and flow regulation.

*Keywords:* lakes, climate change, drought indices, remote sensing data, steppe zone, Kulunda, Altai krai

### REFERENCES

- Argyilan E.P., Forman S.L. Lake level response to seasonal climatic variability in the Lake Michigan—Huron system from 1920 to 1995. *J. Great Lakes Res.*, 2003, vol. 29, no. 3, pp. 488–500. [https://doi.org/10.1016/S0380-1330\(03\)70453-5](https://doi.org/10.1016/S0380-1330(03)70453-5)
- Bai J., Chen X., Li J., Yang L., Fang H. Changes in the area of inland lakes in arid regions of central Asia during the past 30 years. *Environ. Monit. Assess.*, 2010, vol. 178, no. 1, pp. 247–256. <https://doi.org/10.1007/S10661-010-1686-Y>
- Beguería S., Vicente-Serrano S.M., Reig F., Latorre B. Standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) revisited: parameter fitting, evapotranspiration models, tools, datasets and drought monitoring. *Int. J. Climatol.*, 2014, vol. 34 (10), pp. 3001–3023. <https://doi.org/10.1002/joc.3887>
- Bulatov V.I., Rotanova I.N., Chernykh D.V. Landscape-ecological and cartographic analysis of lake basin systems of the south of West Siberia (lakes Chany and Kulunda). *Sib. Ekol. Zh.*, 2005, no. 2, pp. 175–182. (In Russ.).
- Che X., Feng M., Sexton J., Channan S., Sun Q., Ying Q., Wang Y. Landsat-based estimation of seasonal water cover and change in arid and semi-arid Central Asia (2000–2015). *Remote Sens.*, 2019, vol. 11, pp. 1323. <https://doi.org/10.3390/RS11111323>
- Chernykh D.V., Zolotov D.V., Biryukov R.Yu., Pershin D.K. Spatiotemporal dynamics of aquatic and associated geosystems in the south of Western Siberia under cli-



- mate change. In *Degradatsiya zemel' i opustynivanie: problemy ustoichivogo prirodopol'zovaniya i adaptatsii. Mat. Mezhd. konf.* [Land Degradation and Desertification: Problems of Sustainable Land Management and Adaptation: Proc. Int. Sci. Pract. Conf.]. Moscow: MAKS Press, 2020, pp. 135–140. (In Russ.).
- Congalton R., Green K. *Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data: Principles and Practices*. Boca Raton: CRC Press, 2009, 2nd ed. 183 p.
- Degefie D.T., Fleischer E., Klemm O., Soromotin A.V., Soromotina O.V., Tolstikov A.V., Abramov N.V. Climate extremes in South Western Siberia: past and future. *Stoch. Environ. Res. Risk Assess.*, 2014, vol. 28, pp. 2161–2173.  
<https://doi.org/10.1007/s00477-014-0872-9>
- Doklad ob osobennostyakh klimata na territorii Rossiiskoi Federatsii za 2020 god* [Report on the Features of Climate in the Russian Federation in 2020]. Moscow: Rosgidromet, 2021. 104 p.
- Fang L., Tao S., Zhu J., Liu Y. Impacts of climate change and irrigation on lakes in arid northwest China. *J. Arid Environ.*, 2018, vol. 154, pp. 34–39.  
<https://doi.org/10.1016/j.JARIDENV.2018.03.008>
- Groisman P.Ya., Blyakharchuk T.A., Chernokulsky A.V. et al. Climate changes in Siberia. In *Regional Environmental Changes in Siberia and Their Global Consequences*. Groisman P., Gutman G., Eds. Dordrecht: Springer, 2013, pp. 57–109.  
[https://doi.org/10.1007/978-94-007-4569-8\\_3](https://doi.org/10.1007/978-94-007-4569-8_3)
- Gubarev M.S., Rybkina I.D., Stoyashcheva N.V. Inspection of ponds and small reservoirs at Aley river tributaries in the steppe zone of the Altai region. *Vestn. Altai Gos. Agrarn. Univ.*, 2017, vol. 152, no. 6, pp. 61–68. (In Russ.).
- Hayashi M., van der Kamp G., Rosenberry D.O. Hydrology of prairie wetlands: understanding the integrated surface-water and groundwater processes. *Wetland*, 2016, vol. 36, pp. 237–254.  
<https://doi.org/10.1007/s13157-016-0797-9>
- Kharlamova N.F. Climatic variability of the Kulunda steppe. In *KULUNDA: Climate Smart Agriculture. South Siberian Agro-steppe as Pioneering Region for Sustainable Land Use*. Frühauf M., Guggenberger G., Meinel T., Theesfeld I., Lentz S., Eds. Cham: Springer, 2020, pp. 19–32.  
<https://doi.org/10.1007/978-3-030-15927-6>
- Leibowitz S.G., Vining K.C. Temporal connectivity in a prairie pothole complex. *Wetlands*, 2003, vol. 23, no. 1, pp. 13–25.
- Lenters J.D., Kratz T.K., Bowser C.J. Effects of climate variability on lake evaporation: Results from a longterm energy budget study of Sparkling Lake, northern Wisconsin (USA). *J. Hydrol.*, 2005, vol. 308, pp. 168–195.  
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.10.028>
- McFeeters S.K. The use of normalized difference water index (NDWI) in the delineation of open water features. *Int. J. Remote Sens.*, 1996, vol. 17, pp. 1425–1432.  
<https://doi.org/10.1080/01431169608948714>
- Mikkola K. A remote sensing analysis of vegetation damage around metal smelters in the Kola Peninsula, Russia. *Int. J. Remote Sens.*, 1996, vol. 17, pp. 3675–3690.  
<https://doi.org/10.1080/01431169608949177>
- Obzor ekologicheskogo sostoyaniya ozera Chany (Zapadnaya Sibir')* [Chay Lake (Western Siberia) Environmental Profile]. Vasil'ev O.F., Veen J., Eds. Novosibirsk: GEO Publ., 2015. 255 p.
- Orlova I.V. Problems of irrigation development in Altai Krai and issues of its environmental safety. *Polzunovskii Vestn.*, 2011, no. 4-2, pp. 93–97. (In Russ.).
- Ozesmi S.L., Bauer M.E. Satellite remote sensing of wetlands. *Wetl. Ecol. Manag.*, 2002, vol. 10, no. 5, pp. 381–402.  
<https://doi.org/10.1023/A:1020908432489>
- Prishchepov A.V., Radeloff V.C., Baumann M., Kuemmerle T., Müller D. Effects of institutional changes on land use: agricultural land abandonment during the transition from state-command to market-driven economies in post-Soviet Eastern Europe. *Environ. Res. Lett.*, 2012, vol. 7, pp. 1–13.  
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/2/024021>
- Sada R., Schmalz B., Kiesel J., Fohrer N. Projected changes in climate and hydrological regimes of the Western Siberian lowlands. *Environ. Earth Sci.*, 2019, vol. 78, no. 2, pp. 1–15.  
<https://doi.org/10.1007/s12665-019-8047-0>
- Shaw D.A., van der Kamp G., Conly F.M., Pietroniro A., Martz L. The fill-and-spill hydrology of prairie wetland complexes during drought and deluge. *Hydrol. Process.*, 2012, vol. 26, pp. 3147–3156.  
<https://doi.org/10.1002/hyp.8390>
- Shulgina T.M., Genina E.Yu., Gordov E.P. Dynamics of climatic characteristics influencing vegetation in Siberia. *Environ. Res. Lett.*, 2011, vol. 6, no. 4, pp. 1–7.  
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/6/4/045210>
- Silio-Calzada A., Barquín J., Huszar V.L.M., Mazzeo N., Méndez F., Álvarez-Martínez J.M. Long-term dynamics of a floodplain shallow lake in the Pantanal wetland: Is it all about climate? *Sci. Total Environ.*, 2017, vols. 605–606, pp. 527–540.  
<https://doi.org/10.1016/j.SCITOTENV.2017.06.183>
- Svoboda M., Hayes M., Wood D. *Standardized Precipitation Index User Guide*. Geneva: World Meteorological Organization, 2012. 24 p.
- Thornthwaite C.W. An approach toward a rational classification of climate. *Geogr. Rev.*, 1948, vol. 38, pp. 55–94.  
<https://doi.org/10.2307/2107309>
- Tiner R.W. Geographically isolated wetlands of the United States. *Wetlands*, 2003, vol. 23, no. 3, pp. 494–516.  
[https://doi.org/10.1672/0277-5212\(2003\)023\[0494:GIWOTU\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1672/0277-5212(2003)023[0494:GIWOTU]2.0.CO;2)
- Vicente-Serrano S.M., Beguería S., López-Moreno J.I. A multiscale drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *J. Climate*, 2010, vol. 23, no. 7, pp. 1696–1718.  
<https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1>
- Walker D.A., Acevedo W. *Vegetation and a Landsat-Derived Land Cover Map of the Beechey Point Quadrangle, Arctic Coastal Plain, Alaska*. CRREL Report 87–5. Hanover, NH: U.S. Army Cold Regions Engineering and Research Laboratory, 1987. 63 p.
- Zhang J., Ding J., Wu P., Tan J., Huang S., Teng D., Chen W. Assessing arid inland lake watershed area and vegetation response to multiple temporal scales of drought across the Ebinur lake watershed. *Sci. Rep.*, 2020, vol. 10, no. 1, pp. 1–17.  
<https://doi.org/10.1038/s41598-020-57898-8>

## ПРОБЛЕМЫ ДЕГРАДАЦИИ ЗЕМЕЛЬ И УСТОЙЧИВОГО ЗЕМЛЕПОЛЬЗОВАНИЯ

УДК 631.92

### ДИНАМИКА ПЛОЩАДИ ГАРЕЙ В ЗОНАЛЬНЫХ ЛАНДШАФТАХ ЮГО-ВОСТОКА ЕВРОПЕЙСКОЙ ЧАСТИ РОССИИ

© 2022 г. С. С. Шинкаренко<sup>a, b, \*</sup>, В. В. Дорошенко<sup>c</sup>, А. Н. Берденгалиева<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

<sup>b</sup>ФНЦ агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения РАН, Волгоград, Россия

<sup>c</sup>Волгоградский государственный университет, Волгоград, Россия

\*e-mail: [shinkarenkos@vifanc.ru](mailto:shinkarenkos@vifanc.ru)

Поступила в редакцию 27.06.2021 г.

После доработки 18.08.2021 г.

Принята к публикации 12.10.2021 г.

Представлены результаты геоинформационного картографирования и анализа природных пожаров в естественных ландшафтах Астраханской и Волгоградской областей и Республики Калмыкии за 1997–2020 гг. На основе экспертного дешифрирования спутниковых изображений Landsat с верификацией по данным детектирования активного горения и выгоревших площадей идентифицировано более 13.5 тыс. гарей общей площадью без учета повторяемости более 150 тыс. км<sup>2</sup>. Наибольшая площадь гарей зафиксирована в 2006 г. – более 18 тыс. км<sup>2</sup>. Всего же в указанных регионах пройдено огнем 62.5 тыс. км<sup>2</sup>, что составляет треть естественных зональных ландшафтов. До 90% количества пожаров представлено горящими площадью до 10 км<sup>2</sup>, в то время как половина выгоревшей площади является следствием катастрофических пожаров площадью более 250 км<sup>2</sup> каждый, которые случаются 2–3 раза в год. Максимальная частота пожаров составила 14 случаев за период исследований. Выявлены пространственные закономерности в распределении гарей. Участки с наибольшей частотой пожаров расположены в Волгоградском и Астраханском Заволжье с меньшим аграрным освоением, а также в заповеднике “Чёрные земли” и его окрестностях, где запрещен выпас скота. Рост поголовья скота в Калмыкии и правобережной части Астраханской области, вовлечение залежей в оборот в Волгоградской области в последнее десятилетие повлекли снижение количества и площадей пожаров. В Волгоградской области отмечен значимый отрицательный тренд количества пожаров, а в Калмыкии – количества и площади. Полученные результаты, кроме данных о динамике выгоревших площадей позволяют определить продолжительность пирогенных сукцессий, что даст возможность изучить закономерности изменения состояния ландшафтов после пожаров разных лет с учетом их повторяемости. Также результаты помогут оптимизировать противопожарную профилактику.

*Ключевые слова:* природные пожары, дистанционное зондирование, аридные экосистемы, Волгоградская область, Астраханская область, Калмыкия

DOI: 10.31857/S2587556622010113

#### ВВЕДЕНИЕ

Социально-экономические изменения в конце XX в. привели на юго-востоке Европейской России к снижению посевных площадей и поголовья скота. В результате на огромных площадях залежных земель, сенокосов и пастбищ накапливалась мортмасса. Этот фактор стал причиной интенсификации природных пожаров в степных ландшафтах (Тишков, 2009; Dara et al., 2019; Dubinin et al., 2011; Pavleichik, Chibilev, 2018). Лесная пирология и мониторинг пожаров на землях Государственного лесного фонда развиты достаточно хорошо (Барталев и др., 2017), уже на протяжении 15 лет функционирует информационная система дистанционного мониторинга Рослесхоза

(ИСДМ-Рослесхоз), охватывающая леса на всей территории России (Ковалев и др., 2020). Определению площадей гарей на нелесных землях посвящено намного меньше исследований. В основном они касаются особо охраняемых природных территорий (ООПТ) (Павлейчик, 2018; Ткачук, 2015; Шинкаренко и др., 2021б), либо отдельных регионов (Шинкаренко, 2018; Шинкаренко, Берденгалиева, 2019) или их частей (Дубинин и др., 2010). Имеющиеся исследования все-российского охвата, как правило, ограничены по периоду наблюдений (Барталев и др., 2012; Бондур и др., 2019). Исследования, которые охватывают несколько регионов, основаны либо на данных дистанционного зондирования низкого про-

странственного разрешения (Дубинин и др., 2010; Павлейчик, 2019), либо на информационных продуктах детектирования активного горения и выгоревших площадей, полученных на основе автоматизированной обработки спутниковых данных (Бондур и др., 2019; Шинкаренко и др., 2021а). В то же время установлено, что указанные информационные продукты в нелесных ландшафтах имеют большое количество как пропусков, так и ложных срабатываний, а ИСДМ-Рослесхоз практически не охватывает степные пожары. Использование данных низкого пространственного разрешения не позволяет идентифицировать небольшие по площади пожары.

Степные пожары являлись существенным фактором состояния растительного покрова на протяжении тысячелетий (Тишков, 2009). Последствиями природных пожаров являются изменения растительности (Ильина, 2011; Рябинина и др., 2018; Dusaeva et al., 2019; Suleymanova et al., 2019; Williams et al., 2003), почв (Мергелов, 2015) и животного мира (Немков, Сапица, 2010; Bakiev et al., 2019), спектрально-отражательных и термодинамических характеристик земного покрова (Павлейчик и др., 2020; Шинкаренко, 2021). Задымление и смог из-за пожаров ухудшают условия проживания населения (Жаринов, Голубева, 2018). Кроме того, пожары служат причиной эмиссий углеродсодержащих газов, аэрозолей, в том числе “черного углерода” (Бондур и др., 2019). Таким образом, определение выгоревших площадей должно быть обязательным этапом ландшафтных исследований (Опарин, Опарина, 2003).

Цель статьи – выявление особенностей динамики площади и частоты (повторяемости) природных пожаров в 1997–2020 гг. на территории Астраханской и Волгоградской областей и Республики Калмыкии.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Выгоревшие площади определялись в естественных зональных ландшафтах, которые используются в основном в качестве пастбищ. Изучаемый регион относится к семиаридной и сухой субгумидной климатическим зонам (Золотокрылин и др., 2020). Территория представлена степным, полупустынным и пустынным типами ландшафтов (Швиденко и др., 2007) с растительным покровом степного и пустынного типов (Safonova, 2019).

Идентификация выгоревших площадей производилась на основе экспертного дешифрирования спутниковых спектральных изображений *Landsat 5, 7, 8*. Указанные спутниковые данные широко используются для идентификации выгоревших площадей (Барталев и др., 2012; Павлейчик, 2018; Шинкаренко, 2018; Шинкаренко, Берденга-

лиева, 2019; Parker et al., 2015; Stroppiana et al., 2012). Выделялись пожары летне-осеннего периода, преобладающие в естественных зональных ландшафтах (Шинкаренко и др., 2021а). Для дополнительной верификации использовались информационные продукты детектирования активного горения MCD14ML (Giglio et al., 2006) и выгоревших площадей MCD64A1 (Giglio et al., 2018), а также FireCCI51 от Европейского космического агентства (Chuviec et al., 2018), основанные на данных архивов MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer). Данный подход применяется достаточно широко и описан в (Павлейчик, 2018; Шинкаренко и др., 2018, 2019, 2021б), поэтому в настоящей статье методика выделения гарей подробно не приводится. Геоинформационная обработка выполнена в программе *QGIS 3.2*, статистическая обработка данных – в *Microsoft Excel*. Площади гарей разбиты на размерные классы как предложено в (Дубинин и др., 2010).

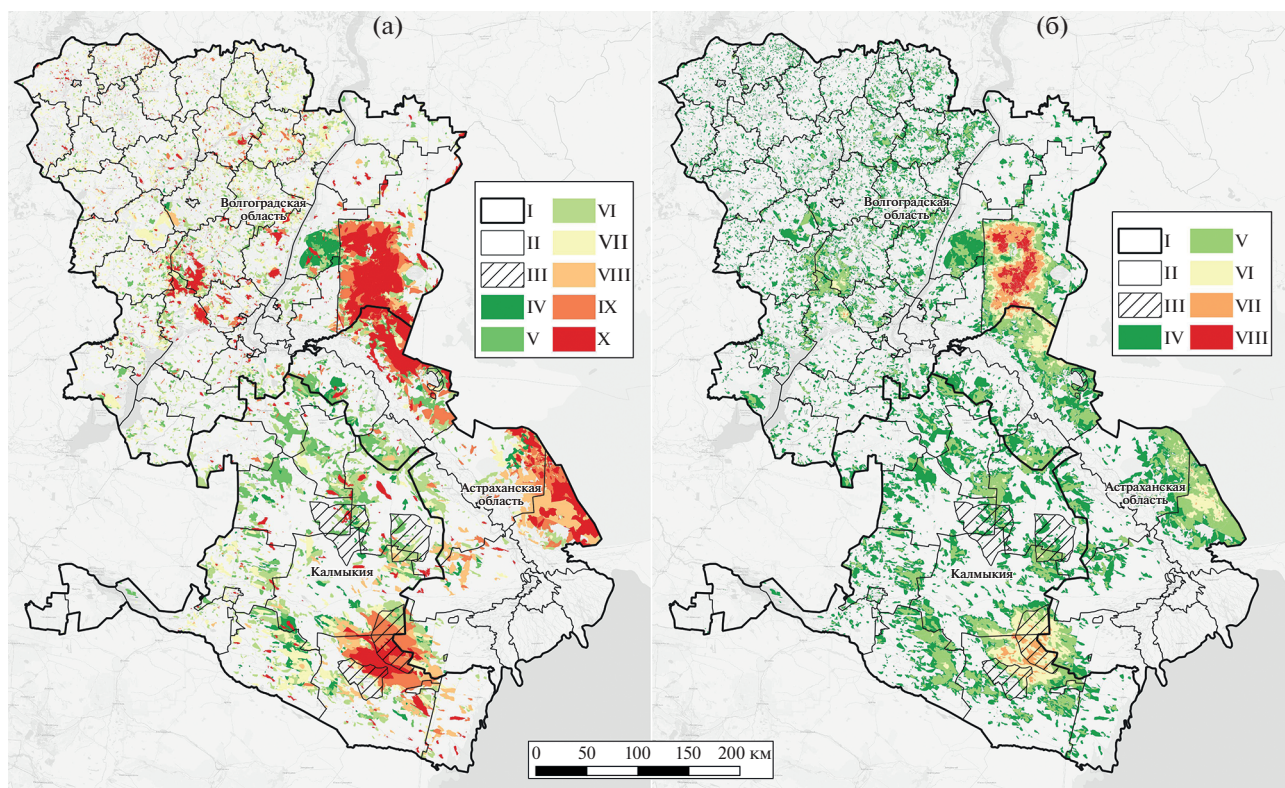
## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

За период 1997–2020 гг. в зональных естественных ландшафтах Астраханской и Волгоградской областей и Калмыкии идентифицировано 13495 гарей общей площадью без учета повторяемости около 154 тыс. км<sup>2</sup> (рис. 1, 2). Таким образом, за 24 года среднемноголетняя выгоревшая площадь составила 6.4 тыс. км<sup>2</sup> при средней площади пожара 11.4 км<sup>2</sup>. В Астраханской области в среднем ежегодно выгорает 1.6 тыс. км<sup>2</sup>, в Волгоградской – 2.8 тыс. км<sup>2</sup> и в Калмыкии – 2.0 тыс. км<sup>2</sup>.

Самые крупные пожары приурочены к наименее освоенным в сельскохозяйственном отношении землям: Заволжье и ООПТ. В Заволжье Волгоградской области расположено несколько тысяч км<sup>2</sup> неиспользуемых в сельском хозяйстве земель, на ООПТ хозяйственная деятельность ограничена или запрещена, в Астраханском Заволжье пастбищные нагрузки ниже, чем в правобережной части, к тому же на левом берегу Ахтубы расположено газоконденсатное месторождение и развита транспортная инфраструктура. Эти факторы способствуют накоплению растительной ветоши, что способствует выгоранию огромных площадей в отдельные годы (Шинкаренко, 2018; Шинкаренко, Берденгалиева, 2019), а в итоге – к росту рисков степных пожаров. Максимальные выгоревшие площади в районе исследований зафиксированы в 1998 (12.4 тыс. км<sup>2</sup>), 2001 (13.2), 2002 (14.1), 2005 (10.3), 2006 (18.2), 2007 (10.7), 2011 (8.8), 2014 (8.7) и 2017 (6.9 тыс. км<sup>2</sup>) гг.

По официальным данным<sup>1</sup>, доступным с 2009 г., максимальные площади пожаров в изучаемых

<sup>1</sup> <https://fedstat.ru/indicators/> (дата обращения 20.06.2021).



**Рис. 1.** Выгоревшие площади: (а) годы пожаров: IV – 1997–2000, V – 2001–2003, VI – 2004–2006, VII – 2007–2010, VIII – 2011–2013, IX – 2014–2016, X – 2017–2020; (б) повторяемость пожаров за 1997–2020 гг., количество случаев: IV – 1, V – 2–4, VI – 5–7, VII – 8–10, VIII – 11–14. I – границы регионов, II – границы районов, III – федеральные ООПТ.

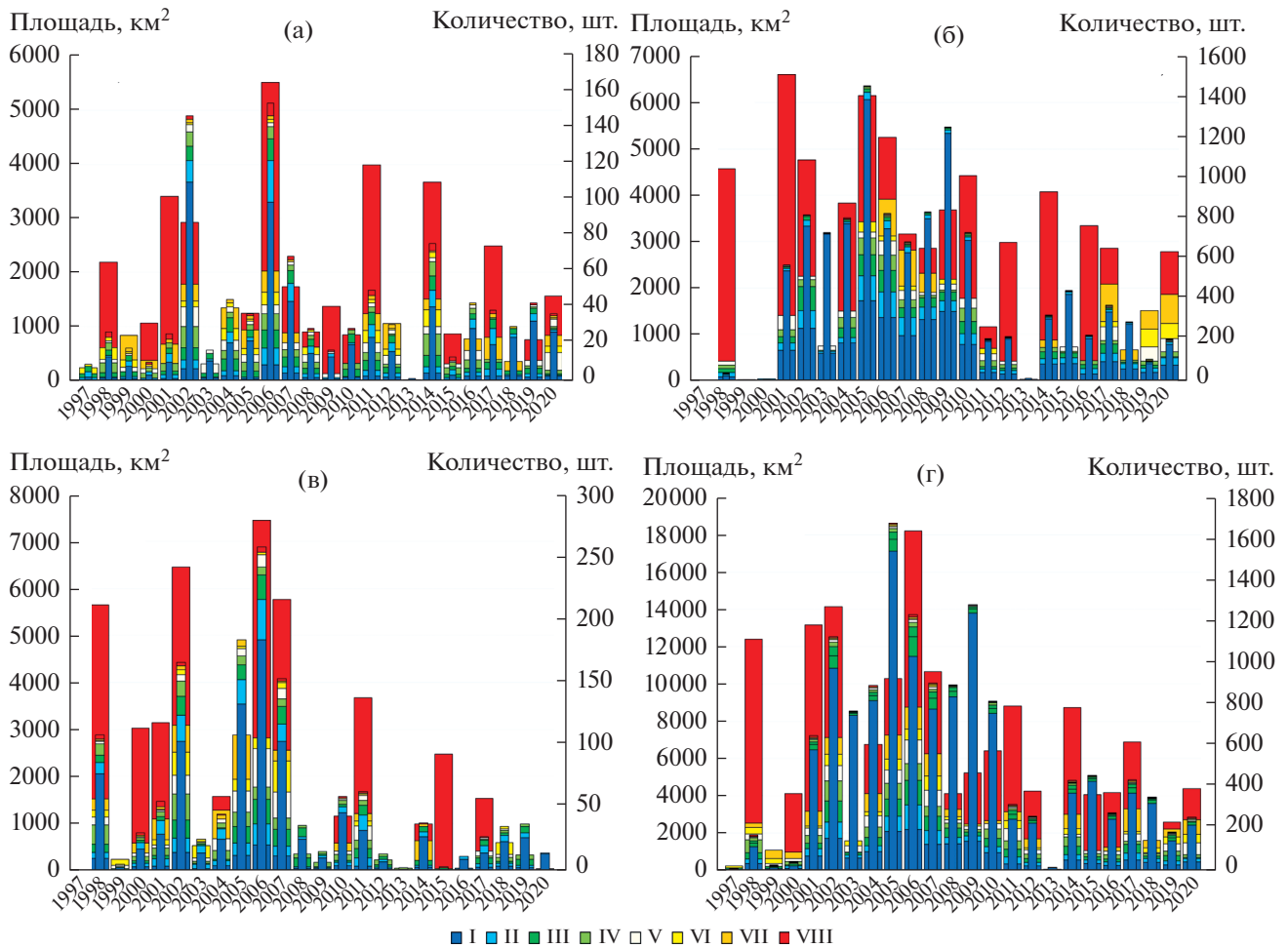
субъектах РФ (120 км<sup>2</sup>) были в 2011 г., в последующие годы эта величина не превышала 20–30 км<sup>2</sup>. В литературе отсутствуют данные о выгоревших площадях в субъектах Южного федерального округа (ЮФО) кроме работ авторов. Так, по данным *Surface Reflectance Burnt Area (SRBA)* (Барталев и др., 2012), в 2011 г. в ЮФО выгорело 8.5 тыс. км<sup>2</sup>, а анализ данных MCD64A1 для этой территории показал площадь 16.3 тыс. км<sup>2</sup> (Бондур и др., 2019). По нашим данным, только в зональных естественных ландшафтах трех изучаемых субъектов, занимающих менее половины площади ЮФО, пройдено огнем в этот год 8.8 тыс. км<sup>2</sup>. Это свидетельствует о существенном недоучете гарей продуктом SRBA. По данным MCD64A1 (Бондур и др., 2019), за 2002–2017 гг. в ЮФО суммарное значение выгоревшей площади составило 259 тыс. км<sup>2</sup>, из которых на луга и степи приходится только 112 тыс. км<sup>2</sup>. Нами за аналогичный период получена величина 114.4 тыс. км<sup>2</sup> в трех рассматриваемых субъектах. Таким образом, можно констатировать, что имеющиеся оценки площади гарей для юго-востока Европейской России существенно занижены. Кроме того, достоверные данные по количеству пожаров в зональных ландшафтах отсутствуют.

В (Дубинин и др., 2010) на основе экспертного дешифрирования данных низкого пространственного разрешения MODIS для пяти муниципальных районов Чёрных земель за 2000–2008 гг. суммарная выгоревшая площадь составила 27.9 тыс. км<sup>2</sup>, по официальной статистике МЧС – 0.5 тыс. км<sup>2</sup> (Дубинин и др., 2010), наша оценка для аналогичного периода – 23.5 тыс. км<sup>2</sup>. Такая разница может быть обусловлена различием пространственного разрешения использованных данных: 30 м у Landsat, 250 м у MODIS и 1000 м у теплового канала. В результате, к выгоревшим относятся площади, фактически не прошедшие огнем, но расположенные в окружении гарей. В пользу этого говорят сплошные изображения гарей в (Дубинин и др., 2010), хотя должны быть вычтены как минимум площади многочисленных на Чёрных землях солончаков, массивов открытых песков и дефлированные земли без растительного покрова, пожары на которых невозможны.

В Волгоградской области почти 95% гарей имеют площадь менее 10 км<sup>2</sup>, а 61% – менее 1 км<sup>2</sup>, при этом данный размерный класс составляет всего 20% от всех гарей региона (рис. 3). В Калмыкии и Астраханской области доля гарей до 10 км<sup>2</sup> составляет 62 и 67% соответственно, доля



Рис. 2. Годы с максимальными выгоревшими площадями. I – границы регионов, II – границы районов, III – федеральные ООПТ, IV – выгоревшие площади.



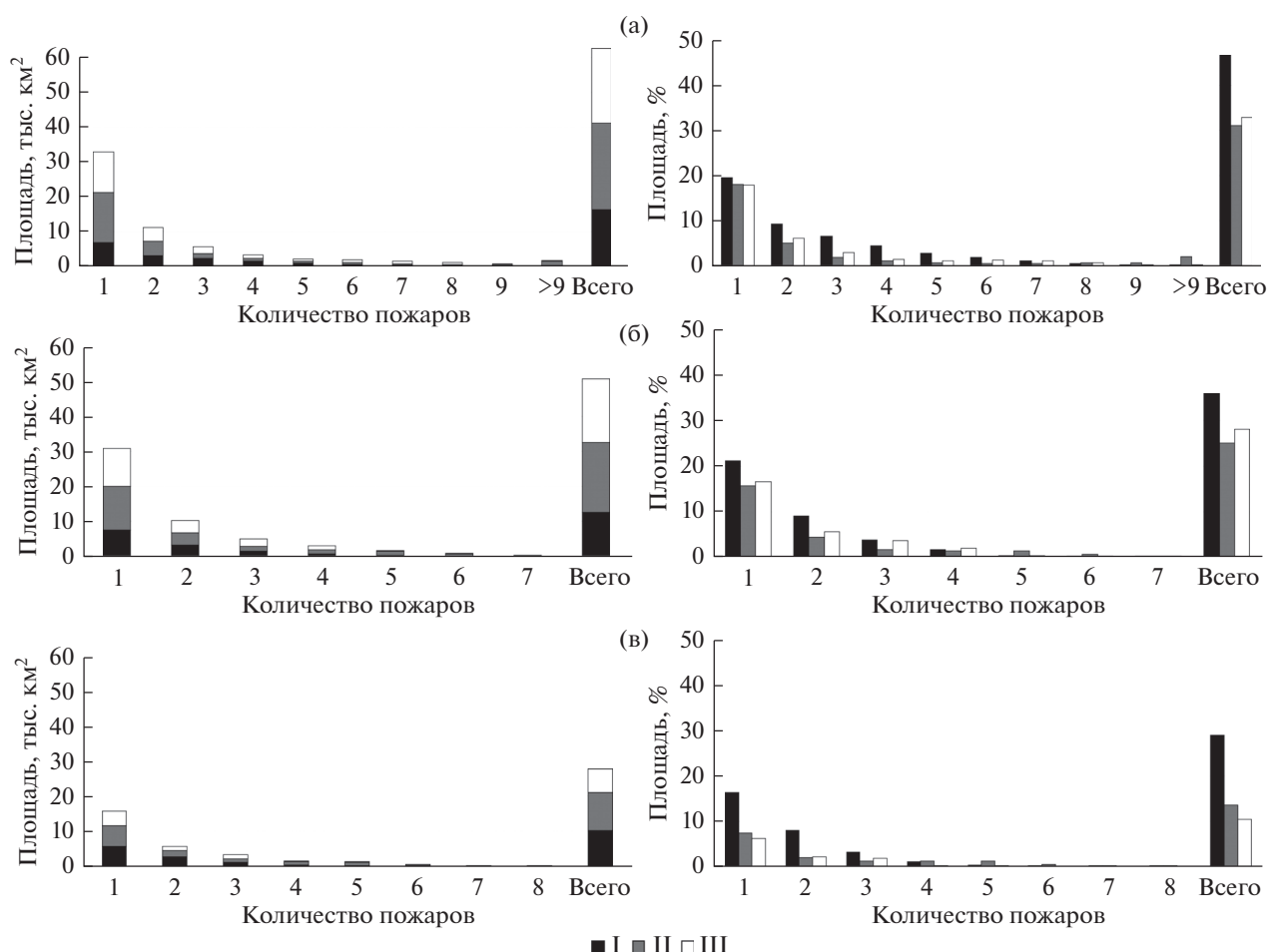
**Рис. 3.** Динамика выгоревших площадей разных размерных классов: (а) Астраханская область; (б) Волгоградская область; (в) Республика Калмыкия; (г) сумма по трем субъектам РФ. Широкие столбцы – площадь, узкие – количество пожаров; размерные классы (км<sup>2</sup>): I – до 10, II – 10.1–20, III – 20.1–35, IV – 35.1–60, V – 60.1–100, VI – 100.1–150, VII – 150.1–250, VIII – более 250.

выгоревшей площади, которая приходится на пожары этого размерного класса, не превышает 7%. В Волгоградской области и Калмыкии половина выгоревшей площади представлена 25 и 24 пожарами соответственно площадью более 250 км<sup>2</sup> каждый, в Астраханской области таких пожаров зафиксировано 35 с долей 51.6% от общей площади пожаров в регионе. Таким образом, наибольшие выгоревшие площади представлены относительно небольшим количеством пожаров: 53.5% гарей на юго-востоке европейской части России обусловлены катастрофическими пожарами более 250 км<sup>2</sup>. Их количество составляет всего 0.6% от числа всех степных пожаров.

Анализ повторяемости пожаров (рис. 4) позволяет определить пространственные закономерности в распределении гарей и наиболее пожароопасные участки. В Волгоградской и Астраханской областях к таким территориям относится

Заволжье, а в Калмыкии – заповедник “Чёрные земли” и его окрестности (см. рис. 1). Это наименее освоенные в хозяйственном отношении площади, используемые как пастбища, либо имеющие режим ООПТ.

Общая пройденная огнем площадь на исследованных территориях составляет 62.5 тыс. км<sup>2</sup>, из которых 24.8 тыс. км<sup>2</sup> расположены в Волгоградской области, 16.3 тыс. км<sup>2</sup> – в Астраханской, и 21.3 тыс. км<sup>2</sup> – в Калмыкии. Максимальное количество пожаров за 1997–2020 гг. составило 14 случаев на площади около 10 км<sup>2</sup> в Волгоградском Заволжье. Всего выгорело 34.7% зональных естественных ландшафтов в трех исследуемых субъектах, наибольшая доля гарей в Астраханской области – 46.6%. В Волгоградской области и Калмыкии доля пройденной огнем площади составляет 31 и 32.8% соответственно. Половина (52.7%) всех гарей пройдена огнем один раз (см.



**Рис. 4.** Площади гарей (тыс. км<sup>2</sup>) с разным количеством пожаров (слева) и доля (%) выгоревших зональных ландшафтов в регионе (справа) за разные периоды: (а) 1997–2020 гг., (б) 2000–2009 гг., (в) 2010–2020 гг. I – Астраханская область, II – Волгоградская область, III – Калмыкия.

рис. 4), 17,9% – дважды, 9% – трижды. В Астраханской области преобладают площади, пройденные огнем два и более раз.

После регулярных пожаров изменяется ботанический состав растительных сообществ в сторону более устойчивых к пирогенному воздействию видов (Рябинина и др., 2018; Тишков, 2009; Coppoletta et al., 2016; Ellsworth et al., 2020). Как правило, полукустарнички (например, *Artemisia* spp., *Kochia prostrata*) замещаются дерновинными злаками на суглинистых почвах полупустыни (например, *Agropyron* spp., *Stipa* spp.) и эфемероидами и эфемерами на песках и супесях (*Poa bulbosa*, *Anisantha tectorum*). Указанные виды заканчивают вегетацию уже к середине лета (Шинкаренко, Барталев, 2020) и представляют собой горючий материал, что ведет к повышенной пожарной опасности. Таким образом, в результате пирогенного воздействия растительность сменяется на более устойчивую к пожарам, но она же, в свою оче-

редь, служит источником повышенной пожарной опасности (Рябинина и др., 2018).

После 2010 г. в изучаемых субъектах существенно сократилось количество регистрируемых очагов активного горения, в первую очередь на пахотных землях Волгоградской области (Шинкаренко и др., 2021а). В естественных ландшафтах снижение выгоревших площадей составило 46% (с 8,8 до 4,7 км<sup>2</sup> в год), а количества гарей – на 63% (табл. 1, рис. 5). Наиболее сильное уменьшение площадей и количества гарей отмечено в Калмыкии – на 68 и 71% соответственно. В Астраханской области наименьшие относительные изменения горимости и количества пожаров: 25 и 35% соответственно. Изменения количества и площади пожаров могут быть связаны как с климатическими изменениями, так и с интенсификацией антропогенной нагрузки (Dubinin et al., 2011). Так, на Чёрных землях в последние несколько лет из-за летних засух и роста пастбищных нагрузок увеличилась площадь открытых песков и дефли-

**Таблица 1.** Среднегодовые значения горимости, площадей, количества и близости гарей, соответствующие угловые коэффициенты линейных трендов ( $k$ ), коэффициенты корреляции ( $r$ )

Показатель		Регион			
		Астраханская область	Волгоградская область	Калмыкия	Всего
Средняя площадь, тыс. км <sup>2</sup> /год	2001–2020 гг.	1.7	2.9	2.0	6.7
	2000–2009 гг.	2.0	3.7	3.1	8.8
	2010–2020 гг.	1.5	2.2	1.0	4.7
	$k$	–0.05	–0.11	–0.19	–0.35
	$r$	0.22	0.35	0.53	0.47
Среднее количество, шт./год	2001–2020 гг.	45	527	60	633
	2000–2009 гг.	55	796	97	948
	2010–2020 гг.	36	283	27	346
	$k$	–1.26	–30.80	–4.93	–36.99
	$r$	0.20	0.49	0.44	0.51
Средняя горимость, %/год	2001–2020 гг.	4.9	3.7	3.1	3.7
	2000–2009 гг.	5.7	4.6	4.8	4.9
	2010–2020 гг.	4.2	2.8	1.6	2.6
	$k$	–0.15	–0.15	–0.29	–0.19
	$r$	0.22	–0.01	0.53	0.47
$r$ горимость	Температура	–0.70	–0.53	–0.75	–
	Осадки	0.19	0.45	0.57	–
	Поголовье	–0.60	–0.03	–0.81	–
$r$ количество	Температура	–0.53	–0.45	–0.67	–
	Осадки	0.54	0.28	0.58	–
	Поголовье	–0.76	–0.17	–0.71	–

Примечание: Курсив – значимые тренды и коэффициенты корреляции ( $p > 0.95$ ).

рованных земель (Шинкаренко, 2019), на которых пожары невозможны из-за отсутствия горючего материала.

Пожарный режим исследуемой территории характеризуется значимыми отрицательными трендами горимости, площадей и количества пожаров (см. табл. 1). При этом среди регионов значимый отрицательный тренд количества пожаров только в Волгоградской области. Он не приводит к уменьшению выгоревших площадей из-за того, что большая часть гарей обусловлена единичными катастрофическими пожарами. В Астраханской области коэффициенты трендов отрицательные, но не проходят проверку значимости по критерию Стьюдента. В Калмыкии снижаются как выгоревшие площади и горимость, так и количество пожаров со статистически значимыми угловыми коэффициентами трендов. Основная причина снижения горимости – деградация растительного покрова из-за засух и чрезмерных

пастбищных нагрузок. В пользу этого говорят значимые отрицательные коэффициенты корреляции горимости, количества пожаров, годовых сумм осадков, среднегодовых температур и поголовья скота как факторов динамики растительного покрова (см. табл. 1).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время официальная статистика выгоревших площадей охватывает только лесные и нелесные земли Государственного лесного фонда. В зональных ландшафтах юго-востока Европейской России, используемых в основном в качестве пастбищ, существующие системы мониторинга охватывают не более 50–60% фактически выгоревших площадей. По данным экспертного дешифрирования спутниковых изображений *Landsat* за 1997–2020 гг., в Астраханской и Волгоградской областях и Калмыкии идентифицирова-



но около 13.5 тыс. гарей общей площадью более 150 тыс. км<sup>2</sup> без учета повторяемости. Гари занимают 62.5 тыс. км<sup>2</sup>, или 35% общей площади естественных зональных ландшафтов региона. Половина площади гарей обусловлена небольшим количеством катастрофических пожаров площадью более 250 км<sup>2</sup> каждый (в среднем 1–2 случая в год в каждом субъекте). Наибольшая площадь природных пожаров зафиксирована в 2006 г. – более 18 тыс. км<sup>2</sup>, около 10 тыс. км<sup>2</sup> выгорело в 1998, 2001, 2002, 2005–2007 гг.

Самые значительные площади гарей представлены в Заволжье Волгоградской и Астраханской областей, а также в заповеднике “Чёрные земли” и его окрестностях в Калмыкии. Здесь же отмечена наибольшая повторяемость пожаров: более 10 случаев за 1997–2020 гг. Анализ близости расположения гарей показал, что их распределение не является случайным, пожары приурочены к конкретным участкам. Это связано со слабым сельскохозяйственным освоением Волгоградского и Астраханского Заволжья и полным запретом выпаса в заповеднике “Чёрные земли”, где морт-масса выгорает каждые 2–3 года.

Природные пожары должны учитываться при мониторинге состояния растительного покрова в регионе исследований, поскольку пирогенное воздействие является существенным фактором его динамики и продуктивности. На участках, выгорающих каждые 2–3 года, исчезают полукустарнички, преобладают дерновинные злаки, которые в свою очередь приводят к росту горимости. Для распространения пожаров требуется запас растительной ветоши, который накапливается в течение нескольких лет с благоприятными гидротермическими условиями. Пастбищные нагрузки способствуют уменьшению запасов морт-массы, что снижает пожарную опасность.

Во всех изученных субъектах Федерации отмечен отрицательный тренд горимости, количества и площади пожаров. Только в Калмыкии угловые коэффициенты трендов значимые, в Волгоградской области значим тренд количества пожаров. Снижение горимости территории связано с ростом пастбищных нагрузок в Калмыкии и правобережной части Астраханской области и введением в сельскохозяйственный оборот неиспользовавшихся ранее пахотных земель в правобережной части Волгоградской области. По мере продвижения от степей на юг к пустыням роль гидротермических условий меняется от фактора возникновения и распространения пожаров до фактора, стимулирующего накопление достаточной для возникновения пожара морт-массы.

Полученные данные могут использоваться для анализа пирогенных изменений в естественных зональных ландшафтах юго-востока Европейской России, поскольку позволяют определить

длительность послепожарного периода, а также периодичность пожаров. Результаты позволят оптимизировать противопожарную профилактику в регионах, поскольку наглядно показаны территории с наибольшей частотой пожаров и катастрофическими пожарами. Разработанные картографические слои также могут служить опорной выборкой при создании автоматизированных алгоритмов идентификации выгоревших площадей в полупустынных и пустынных ландшафтах, поскольку существующие информационные продукты и подходы не дают достаточной точности, что важно для оптимизации федеральной и региональных систем мониторинга природных пожаров.

### ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-35-60007.

### БЛАГОДАРНОСТИ

В работе использовалась инфраструктура ЦКП “ИКИ-Мониторинг” (Лупян и др., 2015) и возможности сервиса Vega.

### FUNDING

The reported study was funded by RFBR, project no. 19-35-60007.

### ACKNOWLEDGMENTS

The work used the infrastructure of the СКР “ИКИ-Мониторинг” (Lupyan et al., 2015) and the capabilities of the Vega-Science system.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Барталев С.А., Егоров В.А., Ефремов В.Ю., Лупян Е.А., Стыценко Ф.В., Флитман Е.В.* Оценка площади пожаров на основе комплексирования спутниковых данных различного пространственного разрешения MODIS и Landsat-TM/ETM+ // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 2. С. 9–26.
- Барталев С.А., Стыценко Ф.В., Хвостиков С.А., Лупян Е.А.* Методология мониторинга и прогнозирования пирогенной гибели лесов на основе данных спутниковых наблюдений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 6. С. 176–193. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2017-14-6-176-193>
- Бондур В.Г., Цидилина М.Н., Черепанова Е.А.* Космический мониторинг воздействия природных пожаров на состояние различных типов растительного покрова в федеральных округах Российской Федерации // Исслед. Земли из космоса. 2019. № 3. С. 13–32. <https://doi.org/10.31857/S0205-96142019313-32>

- Дубинин М.Ю., Луцкекина А.А., Раделоф Ф.К.* Оценка современной динамики пожаров в аридных экосистемах по материалам космической съемки (на примере Черных земель) // Аридные экосистемы. 2010. Т. 6. № 3. С. 5–16.
- Жаринов С.Н., Голубева Е.И.* Влияние лесных пожаров на показатели смертности населения Тверской области // Изв. РАН. Сер. геогр. 2018. № 4. С. 96–103.
- Золотокрылин А.Н., Черенкова Е.А., Титкова Т.Б.* Аридизация засушливых земель европейской части России и связь с засухами // Изв. РАН. Сер. геогр. 2020. Т. 84. № 2. С. 207–217.
- Ильина В.Н.* Пирогенное воздействие на растительный покров // Самарская Лука: проблемы региональной и глобальной экологии. 2011. Т. 20. № 2. С. 4–30.
- Ковалев Н.А., Луян Е.А., Балашов И.В., Барталев С.А., Бурцев М.А., Ершов Д.В., Кривошеев Н.П., Мазуров А.А.* ИСДМ-Рослесхоз: 15 лет эксплуатации и развития // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 7. С. 283–291.
- Луян Е.А., Прошин А.А., Бурцев М.А., Балашов И.В., Барталев С.А., Ефремов В.Ю., Кашицкий А.В., Мазуров А.А., Матвеев А.М., Суднева О.А., Сычугов И.Г., Толпин В.А., Уваров И.А.* Центр коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных ИКИ РАН для решения задач изучения и мониторинга окружающей среды // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 5. С. 263–284.
- Мергелов Н.С.* Постпирогенная трансформация почв и запасов почвенного углерода в предтундровых редколесьях колымской низменности: каскадный эффект и обратные связи // Изв. РАН. Сер. геогр. 2015. № 3. С. 129–140.
- Немков В.А., Санига Е.А.* Влияние пожаров на фауну наземных членистоногих заповедных степных экосистем // Экология. 2010. № 2. С. 141–147.
- Опарин М.Л., Опарина О.С.* Влияние палов на динамику степной растительности // Поволжский экол. журн. 2003. № 2. С. 158–171.
- Павлейчик В.М.* Опыт применения данных дистанционного зондирования Земли в исследованиях степных пожаров // Успехи современного естествознания. 2018. № 11. С. 377–382.
- Павлейчик В.М.* Широтно-зональная неоднородность развития травяных пожаров в Заволжско-Уральском регионе // Бюл. Оренбург. научн. центра УрО РАН. 2019. № 2. С. 1–14. <https://doi.org/10.24411/2304-9081-2019-12013>
- Павлейчик В.М., Калмыкова О.Г., Сорока О.В.* Особенности теплового режима и увлажнения постпирогенных степных ландшафтов // Изв. РАН. Сер. геогр. 2020. № 4. С. 541–550.
- Рябина Н.О., Канищев С.Н., Шинкаренко С.С.* Современное состояние и динамика степных геосистем юго-востока Русской равнины (на примере природных парков Волгоградской области) // Юг России: экология, и развитие. 2018. № 1. С. 116–127.
- Тишков А.А.* Пожары в степях и саваннах // Вопросы степеведения. 2009. Вып. VII. Оренбург. С. 79–83.
- Ткачук Т.Е.* Динамика площадей степных пожаров на юге Даурии в первом десятилетии XXI века // Уч. записки ЗабГУ. 2015. № 1. С. 72–79.
- Швиденко А., Щепаченко Д., МакКаллум Я.* СД-РОМ “Леса и лесное хозяйство России” Международный институт прикладного системного анализа и Российская Академия наук. Люксембург, Австрия. 2007. [http://www.iiasa.ac.at/Research/FOR/forest\\_c-drom/index.html](http://www.iiasa.ac.at/Research/FOR/forest_c-drom/index.html)
- Шинкаренко С.С.* Изменение спектрально-отражательных характеристик зональных ландшафтов Северного Прикаспия при пирогенном воздействии // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 3. С. 192–206.
- Шинкаренко С.С.* Оценка динамики площадей степных пожаров в Астраханской области // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 1. С. 138–146.
- Шинкаренко С.С.* Пространственно-временная динамика опустынивания на Черных землях // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 6. С. 155–168.
- Шинкаренко С.С., Барталев С.А.* Сезонная динамика NDVI пастбищных ландшафтов Северного Прикаспия по данным MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 5. С. 179–194.
- Шинкаренко С.С., Берденгалиева А.Н.* Анализ многолетней динамики степных пожаров в Волгоградской области // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 2. С. 98–110.
- Шинкаренко С.С., Дорошенко В.В., Берденгалиева А.Н., Комарова И.А.* Динамика горимости аридных ландшафтов России и сопредельных территорий по данным детектирования активного горения // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021а. Т. 18. № 1. С. 149–164.
- Шинкаренко С.С., Иванов Н.М., Берденгалиева А.Н.* Пространственно-временная динамика выгоревших площадей на федеральных ООПТ юго-востока Европейской России // Nat. Conservation Res. Заповедная наука. 2021б. Т. 6. № 3. С. 23–44.
- Bakiev A.G., Gorelov R.A., Klenina A.A.* Post-fire abundance and age composition dynamics of *Lacerta agilis* (Reptilia, Lacertidae) in the Orenburg State Nature Reserve (Russia) // Nat. Conservation Res. 2019. Vol. 4 (Suppl. 1). P. 105–109.
- Chuviec E., Pettinari M.L., Lizundia-Loiola J., Storm T., Padilla P.M.* ESA Fire Climate Change Initiative (Fire\_cci): MODIS Fire\_cci Burned Area Pixel product, version 5.1. Centre for Environmental Data Analysis. 2018. November 1, 2018. <https://doi.org/10.5285/58f00d8814064b79a0c49662ad3af537>
- Coppoletta M., Merriam K.E., Collins B.M.* Post-fire vegetation and fuel development influences fire severity patterns in reburns // Ecol. Appl. 2016. Vol. 26. P. 686–699. <https://doi.org/10.1890/15-0225>
- Dara A., Baumann M., Holzner N., Hostert P., Kamp J., Muller D., Ullrich B., Kuemmerle T.* Post-Soviet Land-

- Use Change Affected Fire Regimes on the Eurasian Steppes // *Ecosys.* 2019. Vol. 23. P. 943–956. <https://doi.org/10.1007/s10021-019-00447-w>
- Dubin M., Lushkina A., Radeloff V.C. Climate, Livestock, and Vegetation: What Drives Fire Increase in the Arid Ecosystems of Southern Russia? // *Ecosys.* 2011. Vol. 14. P. 547–562. <https://doi.org/10.1007/s10021-011-9427-9>
- Dusaeva G.Kh., Kalmykova O.G., Dusaeva N.V. Fire influence on dynamics of above-ground phytomass in steppe plant communities in the Burtinskaya Steppe (Orenburg State Nature Reserve, Russia) // *Nat. Conservation Res.* 2019. Vol. 4 (Suppl. 1). P. 78–92. <https://doi.org/10.24189/ncr.2019.050>
- Ellsworth L.M., Kauffman J.B., Reis S.A., Sapsis D., Moseley K. Repeated fire altered succession and increased fire behavior in basin big sagebrush–native perennial grasslands // *Ecosphere.* 2020. Vol. 11 (5):e03124. <https://doi.org/10.1002/ecs2.3124>
- Giglio L., Boschetti L., David P.R., Humber M.L., Justice C.O. The Collection 6 MODIS burned area mapping algorithm and product // *Remote Sens. Environ.* 2018. Vol. 217. P. 72–85. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.08.005>
- Giglio L., Descloitres J., Justice C.O., Kaufman Y.J. An enhanced contextual fire detection algorithm for MODIS // *Remote Sens. Environ.* 2006. Vol. 87. P. 273–282. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(03\)00184-6](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(03)00184-6)
- Pavleichik V.M., Chibilev A.A. Steppe fires in conditions the regime of reserve and under changing anthropogenic impacts // *Geogr. and Nat. Res.* 2018. Vol. 39. № 3. P. 212–221.
- Parker B.M., Lewis T., Srivastava S.K. Estimation and Evaluation of Multi-Decadal Fire Severity Patterns Using Landsat Sensors // *Remote Sens. Environ.* 2015. Vol. 170. P. 340–349. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.09.014>
- Stroppiana D., Bordogna G., Carrara P., Boschetti M., Boschetti L., Brivio P.A. A method for Extracting Burned Areas From Landsat TM/ETM+ Images by Soft Aggregation of Multiple Spectral Indices and a Region Growing Algorithm // *J. Photogramm. Remote Sens.* 2012. Vol. 69. P. 88–102. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2012.03.001>
- Safronova I.N. Semidesert is the paradox of the twentieth century // *Arid Ecosys.* 2019. Vol. 9. № 1. P. 1–6. <https://doi.org/10.1134/S2079096119010098>
- Suleymanova G.F., Boldyrev V.A., Savinov V.A. Post-fire restoration of plant communities with *Paeonia tenuifolia* in the Khvalynsky National Park (Russia) // *Nat. Conservation Res.* 2019. Vol. 4 (Suppl. 1). P. 57–77. <https://doi.org/10.24189/ncr.2019.048>
- Williams R.J., Gill A.M., Anderson A.N., Cook G.D., Williams J.E. Fire behavior // *Fire in tropical savannas: The Kapalga experiment.* N.Y.: Springer–Verlag, 2003. P. 33–46.

## Burned Areas Dynamics in Zonal Landscapes of the South-East of the European Part of Russia

S. S. Shinkarenko<sup>1, 2, \*</sup>, V. V. Doroshenko<sup>3</sup>, and A. N. Berdengalieva<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Space Research Institute, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Federal Scientific Center of Agroecology, Complex Meliorations and Agroforestry RAS, Volgograd, Russia

<sup>3</sup>Volgograd State University, Volgograd, Russia

\*e-mail: shinkarenkos@vfanc.ru

The article presents the results of geoinformation mapping and analysis of wildfires in natural landscapes of Astrakhan and Volgograd oblasts and the Republic of Kalmykia for 1997–2020. On the basis of expert interpretation of Landsat satellite images with verification based on the detection data of active combustion and burnt-out areas, more than 13.5 thousand burns with a total area of over 150 thousand km<sup>2</sup> were identified. The largest burned-out area was recorded in 2006—more than 18 thousand km<sup>2</sup>. In total, 62.5 thousand km<sup>2</sup> were covered by fire in these regions, which is one-third of the natural zonal landscapes. Up to 90% of the number of fires is represented by incidents with an area of up to 10 km<sup>2</sup>, while half of the burnt area is provided by catastrophic fires with an area of more than 250 km<sup>2</sup> each, which occur 2–3 times a year. The maximum frequency of fires was 14 cases during the study period. Analysis of the proximity of burned areas showed the presence of spatial patterns in their distribution. The sites with the highest frequency of fires are located in the Volgograd and Astrakhan Trans-Volga region with less agricultural development, as well as in the Chernye Zemli Nature Reserve and its environs, where livestock grazing is prohibited. The growth of livestock in Kalmykia and the right-bank part of the Astrakhan oblast, the involvement of deposits in circulation in Volgograd oblast in the last decade resulted in a decrease in the number and area of fires. In Volgograd oblast, a significant negative trend in the number of fires was noted, and in Kalmykia—in both the number and area. The obtained results, in addition to data on the dynamics of burnt areas, represent the possibility of determining the duration of pyrogenic successions, which will make it possible to study the patterns of changes in the state of landscapes after fires in different years, taking into account their frequency. Also, the results will help optimize fire prevention.

**Keywords:** landscape fires, remote sensing, arid ecosystems, Volgograd oblast, Astrakhan oblast, Kalmykia

## REFERENCES

- Bakiev A.G., Gorelov R.A., Klenina A.A. Post-fire abundance and age composition dynamics of *Lacerta agilis* (Reptilia, Lacertidae) in the Orenburg State Nature Reserve (Russia). *Nat. Conserv. Res.*, 2019, vol. 4, no. S1, pp. 105–109.  
<https://doi.org/10.24189/ncr.2019.047>
- Bartalev S.A., Egorov V.A., Efremov V.Yu., Loupian E.A., Stytsenko F.V., Flitman E.V. Integrated burnt area assessment based on combine use of multi-resolution MODIS and Landsat-TM/ETM+ satellite data. *Sovr. Probl. DZZ Kosm.*, 2012, vol. 9, no. 2, pp. 9–26. (In Russ.).
- Bartalev S.A., Stytsenko F.V., Khvostikov S.A., Loupian E.A. Methodology of post-fire tree mortality monitoring and prediction using remote sensing data. *Sovr. Probl. DZZ Kosm.*, 2017, vol. 14, no. 6, pp. 176–193. (In Russ.).  
<https://doi.org/10.21046/2070-7401-2017-14-6-176-193>
- Bondur V.G., Tsidilina M.N., Cherepanova E.A. Satellite monitoring of wildfire impacts on the conditions of various types of vegetation cover in the federal districts of the Russian Federation. *Issled. Zemli Kosm.*, 2019, no. 3, pp. 13–32. (In Russ.).  
<https://doi.org/10.31857/S0205-96142019313-32>
- Chuviec E., Pettinari M.L., Lizundia-Loiola J., Storm T., Padilla P.M. *ESA Fire Climate Change Initiative (Fire\_cci51): MODIS Fire\_cci Burned Area Pixel product, version 5.1*. Centre for Environmental Data Analysis, 2018.  
<https://doi.org/10.5285/58f00d8814064b79a0c49662ad3af537>
- Coppoletta M., Merriam K.E., Collins B.M. Post-fire vegetation and fuel development influences fire severity patterns in reburns. *Ecol. Appl.*, 2016, vol. 26, pp. 686–699.  
<https://doi.org/10.1890/15-0225>
- Dara A., Baumann M., Holzel N., Hostert P., Kamp J., Muller D., Ullrich B., Kuemmerle T. Post-Soviet land-use change affected fire regimes on the Eurasian steppes. *Ecosystems*, 2019, vol. 23, pp. 943–956.  
<https://doi.org/10.1007/s10021-019-00447-w>
- Dubinina M., Lushchikina A., Radeloff V.C. Climate, livestock, and vegetation: What drives fire increase in the arid ecosystems of Southern Russia? *Ecosystems*, 2011, vol. 14, no. 4, pp. 547–562.  
<https://doi.org/10.1007/s10021-011-9427-9>
- Dubinina M.Yu., Lushchikina A.A., Radeloff V.C. Assessment of modern burning dynamics in arid ecosystems using remote sensing data (case study of Chernye Zemli). *Arid Ekosist.*, 2010, vol. 6, no. 3, pp. 5–16. (In Russ.).
- Dusaeva G.Kh., Kalmykova O.G., Dusaeva N.V. Fire influence on dynamics of above-ground phytomass in steppe plant communities in the Burtinskaya Steppe (Orenburg State Nature Reserve, Russia). *Nat. Conserv. Res.*, 2019, vol. 4, no. S1, pp. 78–92.  
<https://doi.org/10.24189/ncr.2019.050>
- Ellsworth L.M., Kauffman J.B., Reis S.A., Sapsis D., Mooney K. Repeated fire altered succession and increased fire behavior in basin big sagebrush–native perennial grasslands. *Ecosphere*, 2020, vol. 11, no. 5, e03124.  
<https://doi.org/10.1002/ecs2.3124>
- Giglio L., Boschetti L., David P. R., Humber M.L., Justice C.O. The Collection 6 MODIS burned area mapping algorithm and product. *Remote Sens. Environ.*, 2018, vol. 217, pp. 72–85.  
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.08.005>
- Giglio L., Descloitres J., Justice C.O., Kaufman Y.J. An enhanced contextual fire detection algorithm for MODIS. *Remote Sens. Environ.*, 2006, vol. 87, nos. 2–3, pp. 273–282.  
[https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(03\)00184-6](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(03)00184-6)
- Il'ina V.N. Pyrogenic impact on vegetation cover. *Samar. Luka: Probl. Reg. i Global. Ekol.*, 2011, vol. 20, no. 2, pp. 4–30. (In Russ.).
- Kovalev N.A., Loupian E.A., Balashov I.V., Bartalev S.A., Burtsev M.A., Ershov D.V., Krivosheev N.P., Mazurov A.A. ISDM-Rosleskhoz: 15 years of operation and evolution. *Sovr. Probl. DZZ Kosm.*, 2020, vol. 17, no. 7, pp. 283–291. (In Russ.).  
<https://doi.org/10.21046/2070-7401-2020-17-7-283-291>
- Loupian E.A., Proshin A.A., Burtsev M.A. et al. IKI center for collective use of satellite data archiving, processing and analysis systems aimed at solving the problems of environmental study and monitoring. *Sovr. Probl. DZZ Kosm.*, 2015, vol. 12, no. 5, pp. 263–284. (In Russ.).
- Mergelov N.S. Post-pyrogenic transformation of soils and soil carbon stocks in sub-tundra woodlands of Kolyma Lowland: a cascading effect and feedbacks. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2015, no. 3, pp. 129–140. (In Russ.).
- Nemkov V.A., Sapiga E.A. Impact of fires on the fauna of terrestrial arthropods in protected steppe ecosystems. *Russ. J. Ecol.*, 2010, vol. 41, pp. 173–179.  
<https://doi.org/10.1134/S1067413610020104>
- Oparin M.L., Oparina O.S. Steppe vegetation dynamics under fire. *Povolzhskii Ekol. Zh.*, 2003, no. 2, pp. 158–171. (In Russ.).
- Parker B.M., Lewis T., Srivastava S.K. Estimation and evaluation of multi-decadal fire severity patterns using Landsat sensors. *Remote Sens. Environ.*, 2015, vol. 170, pp. 340–349.  
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.09.014>
- Pavleichik V.M. Experience of data application of remote sensing in studies of steppe fires. *Usp. Sovrem. Estestvozn.*, 2018, no. 11, pp. 377–382. (In Russ.).
- Pavleichik V.M. The Latitudinal-zonal heterogeneity of the development of grass fires in the Volga-Ural region. *Byull. Orenburg. Nauchn. Tsentra UrO RAN*, 2019, no. 2, pp. 1–14. (In Russ.).  
<https://doi.org/10.24411/2304-9081-2019-12013>
- Pavleichik V.M., Chibilev A.A. Steppe fires in conditions the regime of reserve and under changing anthropogenic impacts. *Geogr. Nat. Resour.*, 2018, vol. 39, no. 3, pp. 212–221.  
<https://doi.org/10.1134/S1875372818030046>
- Pavleichik V.M., Kalmykova O.G., Soroka O.V. Features of the thermal regime and humidification of post-pyrogenic steppe landscapes. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2020, vol. 84, no. 4, pp. 541–550. (In Russ.).  
<https://doi.org/10.31857/S2587556620040111>
- Ryabinina N.O., Kanishchev S.N., Shinkarenko S.S. The current state and dynamics of geosystems in the South-

- East of the Russian plain (by the example of the natural parks in Volgograd region). *Yug Rossii: Ekologiya, Razvitiye*, 2018, vol. 13, no. 1, pp. 116–127. (In Russ.).  
<https://doi.org/10.18470/1992-1098-2018-1-116-127>
- Safronova I.N. Semidesert is the paradox of the twentieth century. *Arid Ecosyst.*, 2019, vol. 9, no. 1, pp. 1–6.  
<https://doi.org/10.1134/S2079096119010098>
- Shinkarenko S.S. Assessment of steppe burning dynamics in Astrakhan oblast. *Sovr. Probl. DZZ Kosm.*, 2018, vol. 15, no. 1, pp. 138–146. (In Russ.).  
<https://doi.org/10.21046/2070-7401-2018-15-1-138-146>
- Shinkarenko S.S. Changes in spectral reflectance characteristics of the Northern Caspian zonal landscapes under pyrogenic influence. *Sovr. Probl. DZZ Kosm.*, 2021, vol. 18, no. 3, pp. 192–206. (In Russ.).  
<https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-3-192-206>
- Shinkarenko S.S. Spatial-temporal dynamics of desertification in Black Lands. *Sovr. Probl. DZZ Kosm.*, 2019, vol. 16, no. 6, pp. 155–168. (In Russ.).  
<https://doi.org/10.21046/2070-7401-2019-16-6-155-168>
- Shinkarenko S.S., Bartalev S.A. NDVI seasonal dynamics of the North Caspian pasture landscapes from MODIS data. *Sovr. Probl. DZZ Kosm.*, 2020, vol. 17, no. 4, pp. 179–194. (In Russ.).  
<https://doi.org/10.21046/2070-7401-2020-17-4-179-194>
- Shinkarenko S.S., Berdengalieva A.N. Analysis of steppe fires long-term dynamics in Volgograd oblast. *Sovr. Probl. DZZ Kosm.*, 2019, vol. 16, no. 2, pp. 98–110. (In Russ.).  
<https://doi.org/10.21046/2070-7401-2019-16-2-98-110>
- Shinkarenko S.S., Doroshenko V.V., Berdengalieva A.N., Komarova I.A. Dynamics of arid landscapes burning in Russia and adjacent territories based on active fire data. *Sovr. Probl. DZZ Kosm.*, 2021, vol. 18, no. 1, pp. 149–164. (In Russ.).  
<https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-1-149-164>
- Shinkarenko S.S., Ivanov N.M., Berdengalieva A.N. Spatio-temporal dynamics of burnt areas in federal protected areas of South-East of the European part of Russia. *Nat. Conserv. Res.*, 2021, vol. 6, no. 3, pp. 23–44. (In Russ.).  
<https://doi.org/10.24189/ncr.2021.035>
- Shvidenko A., Shchepashchenko D., MakKallum Ya. *Russian Forests & Forestry*. IIASA, The Russian Academy of Sciences, 2007. Available at: [http://www.iiasa.ac.at/Research/FOR/forest\\_cdrom/index.html](http://www.iiasa.ac.at/Research/FOR/forest_cdrom/index.html) (accessed: 04.11.2021).
- Stroppiana D., Bordogna G., Carrara P., Boschetti M., Boschetti L., Brivio P.A. A method for extracting burned areas from Landsat TM/ETM+ images by soft aggregation of multiple spectral indices and a region growing algorithm. *J. Photogramm. Remote Sens.*, 2012, vol. 69, pp. 88–102.  
<https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2012.03.001>
- Suleymanova G.F., Boldyrev V.A., Savinov V.A. Post-fire restoration of plant communities with *Paeonia tenuifolia* in the Khvalynsky National Park (Russia). *Nat. Conserv. Res.*, 2019, vol. 4, no. S1, pp. 57–77.  
<https://doi.org/10.24189/ncr.2019.048>
- Tishkov A.A. Fires in steppes and savannas. *Vopr. Stepevedeniya*, 2009, no. 7, pp. 79–83. (In Russ.).
- Tkachuk T.E. Dynamics of steppe fires areas in the South of Dauria in the first decade of the 21st century. *Uch. Zap. ZabGU*, 2015, no. 1, pp. 72–79. (In Russ.).
- Williams R.J., Gill A.M., Anderson A.N., Cook G.D., Williams J.E. Fire behavior. In *Fire in Tropical Savannas: The Kapalga Experiment*. Andersen A.N., Cook G.D., Williams R.J., Eds. New York: Springer-Verlag, 2003, pp. 33–46.
- Zharinov S.N., Golubeva E.I. Influence of forest fire on mortality rates of population: a case study of Tver oblast. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2018, no. 4, pp. 96–103. (In Russ.).  
<https://doi.org/10.1134/S2587556618040179>
- Zolotokrylin A.N., Cherenkova E.A., Titkova T.B. Aridization of drylands in the European part of Russia: Secular trends and links to droughts. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2020, vol. 84, no. 2, pp. 207–217. (In Russ.).  
<https://doi.org/10.31857/S258755662002017X>

## ПРОБЛЕМЫ ДЕГРАДАЦИИ ЗЕМЕЛЬ И УСТОЙЧИВОГО ЗЕМЛЕПОЛЬЗОВАНИЯ

УДК 528.8.04:631.417.1:631.459

### ЗАВИСИМОСТЬ МИКРОБИОЛОГИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ И ХИМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЧВЫ ОТ ТОПОГРАФИЧЕСКОЙ ПОЗИЦИИ НА СТАРОПАХОТНЫХ УЧАСТКАХ ЧЕРНОЗЕМНОЙ ЛЕСОСТЕПИ

© 2022 г. Д. В. Карелин<sup>а</sup>, П. Р. Цымбарович<sup>а, \*</sup>

<sup>а</sup>Институт географии РАН, Москва, Россия

\*e-mail: petr@tsymbarovich.ru

Поступила в редакцию 25.06.2021 г.

После доработки 15.07.2021 г.

Принята к публикации 12.10.2021 г.

Необходимость автоматизации и упрощения пространственно-временного мониторинга хозяйственно важных почвенных характеристик, в частности содержания углерода интенсивно используемых земель, диктует продолжение поиска относительно простых способов их дистанционной оценки. В результате статистического анализа материалов полевых наблюдений, лабораторных экспериментов и полученных по данным дистанционного зондирования Земли из космоса цифровых моделей рельефа на модельных трансектах, заложенных на различающихся по характеру рельефа участках длительно используемых пахотных черноземов (Курская биосферная станция Института географии РАН, Курская область, Россия), обнаружены средние по силе положительные связи между крутизной склона, LS-фактором (Slope Length and Steepness factor, или фактор влияния длины и крутизны склона на эрозионную опасность) и почвенными характеристиками. Обнаруженные связи выражаются в снижении содержания ведущих биогенных элементов и соединений (углерод, азот и вода), а также в снижении присутствия и изменении активности микробиоты почвы. Вероятнее всего, это реализуется через водную эрозию и меньшую доступность воды на склонах большей крутизны. На основе полученных результатов можно говорить о применимости оцененного по данным дистанционного зондирования Земли LS-фактора для прогноза содержания углерода и других связанных с ним значимых физико-химических и биологических показателей состояния старопашотных типичных черноземов в крупном пространственном масштабе. Одновременно установлено, что полученные на основе космических снимков спектральные характеристики поверхности почвы менее применимы для этих целей, так как они зависят от условий съемки (погодные условия, приемы обработки почвы, растительный покров), а также имеют ограничения, накладываемые недостаточным разрешением доступных космических снимков.

**Ключевые слова:** типичные черноземы, пашни, эрозионный потенциал рельефа, содержание углерода в почве, эмиссия CO<sub>2</sub> из почвы, дистанционное зондирование Земли, крутизна склона, LS-factor, цифровая модель рельефа

**DOI:** 10.31857/S2587556622010071

#### ВВЕДЕНИЕ

Адекватная оценка содержания и запасов органического углерода в верхнем слое почв (C<sub>орг</sub>) и скорости их деградации в результате хозяйственного использования — одна из важнейших задач современной прикладной экологии. Это связано с тем, что почвы и их состояние жизненно важны для существования наземных экосистем и общества, будучи крупнейшим биосферным резервуаром биогенных веществ, в первую очередь углерода, и основой первичной продукции и плодородия (Schwamghart and Jarmer, 2011). В частности, почвы мира содержат 1500–2400 Гт углерода в

верхнем метровом слое (Scharlemann et al., 2014), что превышает его суммарное содержание в атмосфере и растительности (Friedlingstein et al., 2020). Этот резервуар достаточно подвижен, чтобы отражать общее направление долговременной динамики баланса углерода в местных экосистемах, и играет значимую роль в регуляции концентрации атмосферного углерода и смягчении последствий современного антропогенного потепления (Crowther et al., 2016). C<sub>орг</sub> признан мировым сообществом как ключевой показатель оценки качества и деградации почв в результате эрозии (Croft et al., 2012), а также для поддержания первичной продукции растений. Кроме того, наблю-

даемое сейчас в ряде хозяйственных регионов снижение содержания  $C_{\text{орг}}$  признается одной из основных угроз продовольственной безопасности (Communication ..., 2006). Конвенция ООН по борьбе с опустыниванием (UNCCD) признала карту запасов  $C_{\text{орг}}$  в качестве одного из ключевых показателей оценки площадей деградированных земель в контексте достижения цели нейтрализации процесса деградации земель к 2030 году (IUCN, 2015).

Тем не менее задача пространственно-временной оценки  $C_{\text{орг}}$  отягощается широкой пространственной вариацией самих запасов углерода почвы, что определяется множеством исторических, природных и антропогенных факторов (Lamichhane et al., 2019), а также рутинными и дорогостоящими лабораторными анализами, что не позволяет применять их в широких масштабах (Copant et al., 2011). Главной альтернативой является применение современных методов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). За последнее десятилетие существенно снизилась сложность и повысилась точность дистанционного определения характеристик почвы, как с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) и самолетов, так и со спутников (Angelopoulou et al., 2019). Хотя едва ли в области мониторинга можно будет полностью обойтись без трудоемких наземных измерений и анализов, заменяющие их дистанционные методы уже позволяют без значительных затрат получать точные оценки пространственной или временной изменчивости ключевых показателей состояния почв (Croft et al., 2012; Lamichhane et al., 2019).

Принципиальная возможность применения данных ДЗЗ для оценки почвенных характеристик обеспечивается тем, что в ранних исследованиях было надежно показано, что с увеличением запасов  $C_{\text{орг}}$  отражающая способность всех почв без исключения нелинейно снижается в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах между 400 и 2500 нм (Baumgardner et al., 1970; Irons et al., 1989). Есть два хорошо известных дистанционных предиктора содержания углерода в верхнем слое почвы: крутизна склона и цвет почвы. Темный цвет почвы обычно связан с высоким содержанием органического вещества и естественным плодородием (Chen et al., 2000; Schulze et al., 1993). Негативное влияние крутизны поверхности на содержание органического вещества в почвах связано с действием силы тяжести и водной эрозией. Оба показателя связаны друг с другом и коррелируют с отражающей способностью поверхности почвы. Современный этап исследования этой количественной связи определяется широким применением гиперспектральных сенсоров в сочетании с геостатистическими методами и моделированием (Angelopoulou et al., 2019), а также с

увеличением масштабов съемки и расширением набора экосистем и типов землепользования в отдельном исследовании.

Тем не менее прямые спутниковые оценки по-прежнему сопряжены со значительными искажениями, связанными с углом съемки, характером поверхности и влиянием атмосферы (Angelopoulou et al., 2019), а также влиянием на спектральный ответ почвы корки, образующейся на ее поверхности в результате дождей и засух, фактором обработки, переменной влажностью и текстурой почвы, наличием растительности и пожнивных остатков. Компенсация недостаточного качества и количества данных ДЗЗ требует применения сложных интерполяционных статистических и геостатистических процедур (Gomez et al., 2008). Однако эти подходы не позволяют решить проблему надежного предсказания пространственного распределения  $C_{\text{орг}}$  применительно ко всем новым случаям, что часто требует индивидуальной настройки существующих моделей, или создания новых (Croft et al., 2012; Ladoni et al., 2010). Наилучшие результаты ( $r^2 = 0.62-0.97$ ) при этом достигаются в мелких и средних масштабах с охватом порядка десятков, сотен и тысяч км<sup>2</sup> (Mondal et al., 2017; Schillaci et al., 2017; Wang et al., 2021), а также при использовании БПЛА или самолетов [см. обзор (Angelopoulou et al., 2019)]. При использовании данных ДЗЗ для одного типа землепользования в масштабе одного-нескольких км<sup>2</sup> точность существенно снижается. Улучшению предсказательных возможностей моделей способствует также увеличение пространственной вариабельности  $C_{\text{орг}}$  в пределах рассматриваемой площади. Такое же влияние оказывает и увеличение количества почвенных проб для построения и верификации моделей (Croft et al., 2012; Gomez et al., 2008). Все это накладывает известные ограничения на использование спутниковой информации.

До 2006–2008 гг. собственно спутниковым данным придавалось по сути лишь вспомогательное значение: для оценки границ площадей биотопов и оценки рельефа при исследованиях больших территорий (Lu et al., 2004; Wei et al., 2008 и др.), что было связано с качеством снимков и их стоимостью. Но, начиная с этого периода, доступное научному сообществу разрешение спутниковых сенсоров достигает 0.6–30 м (Vrieling, 2006), и начинает активно применяться гиперспектральная съемка, что позволяет использовать отражательную способность поверхности почв для анализа их состава непосредственно по спутниковым сенсорам (Mondal et al., 2017; Schwanghart and Jarmer, 2011; Wang et al., 2021).

Число научных работ, посвященных аэрокосмической оценке распределения и динамики  $C_{\text{орг}}$  в различных типах почв и экосистемах, резко уве-

личилось за последнее десятилетие и насчитывает уже более 300 публикаций в мировых периодических изданиях [см. обзоры (Angelopoulou et al., 2019; Lamichhane et al., 2019)]. Привлекательность именно спутниковой информации придает регулярность и частота ее поступления, а также значительная площадь охвата территории при достаточно высоком разрешении самих снимков. Тем не менее попыток использования для этой цели только спутниковых данных существенно меньше, что связано с перечисленными выше ограничениями. Если же говорить о черноземах, то посвященных им подобных исследований обнаруживаются единицы (Suleymanov et al., 2021; Takata et al., 2007); также черноземы иногда рассматриваются в составе почвенного покрова крупных регионов (Wei et al., 2008). Это соответствует их небольшой площадной представленности в мире, но не отвечает высокой хозяйственной значимости. Кроме того, в работах по дистанционному зондированию почв при пространственной оценке содержания углерода или степени эродированности почв крайне редко привлекаются другие, прочно связанные с этими факторами, почвенные характеристики, такие как микробная активность, базальное дыхание, эмиссия CO<sub>2</sub>, содержание азота, влаги и прочие.

Цель проведенной работы заключалась в оценке количественной связи между физико-химическими и биологическими характеристиками верхнего слоя старопахотных типичных черноземов (C<sub>орг</sub> в частности), определяемыми наземными методами, его спектральными характеристиками и так называемым LS-фактором (см. ниже), определяемыми с помощью данных ДЗЗ из космоса при среднем пространственном разрешении.

Несмотря на то, что данные более высокого пространственного разрешения в совокупности с результатами наземных измерений и применением БПЛА могут обеспечить более высокую точность предсказания этих характеристик, нами оценивалась применимость именно общедоступных данных ДЗЗ без привлечения дополнительных дорогостоящих источников информации и трудоемких наземных измерений.

Используемый в нашей работе LS-factor (Slope Length and Steepness factor – показатель топографического положения точки наблюдения, прямо пропорциональный длине и уклону склона) широко используется в специальной англоязычной литературе, однако в русскоязычных публикациях пока не появилось единого устоявшегося термина. Согласно анализу российской научной библиотеки eLIBRARY.RU, в качестве эквивалента в текстах статей и аннотациях чаще всего используется словосочетание “эрозионный потенциал рельефа” и его краткий эквивалент “LS-фактор”. Поэтому ради краткости нами в дальнейшем

используется именно этот термин. Этот показатель представляет собой удобный критерий определения эрозионного потенциала, учитывающий совокупное влияние длины и крутизны склона на перенос вещества. Значению LS-фактора прямо пропорциональна степень эрозионной опасности: более высокий показатель указывает на повышенный эрозионный потенциал рельефа. LS-фактор главным образом используется в моделях почвенной эрозии, таких как USLE<sup>1</sup>. Однако эти модели требуют большого количества дополнительной информации из разных источников, как дистанционных, так и наземных. Поэтому привлекательным представляется использование LS-фактора как самостоятельного показателя уровня эрозионной опасности (Буряк, 2014).

В задачи исследования входило:

– выявить, могут ли LS-фактор и спектральные характеристики старопахотных черноземов, оцениваемые по спутниковым данным среднего пространственного разрешения, выступать в качестве самостоятельных, а не вспомогательных предикторов рассматриваемых почвенных характеристик в изучаемом типе ландшафта;

– проверить, позволяет ли рассчитанный на основе спутниковых данных ДЗЗ LS-фактор местности отразить в крупном пространственном масштабе процессы деградации, происходящие в черноземах при их многолетней эксплуатации в качестве пашен.

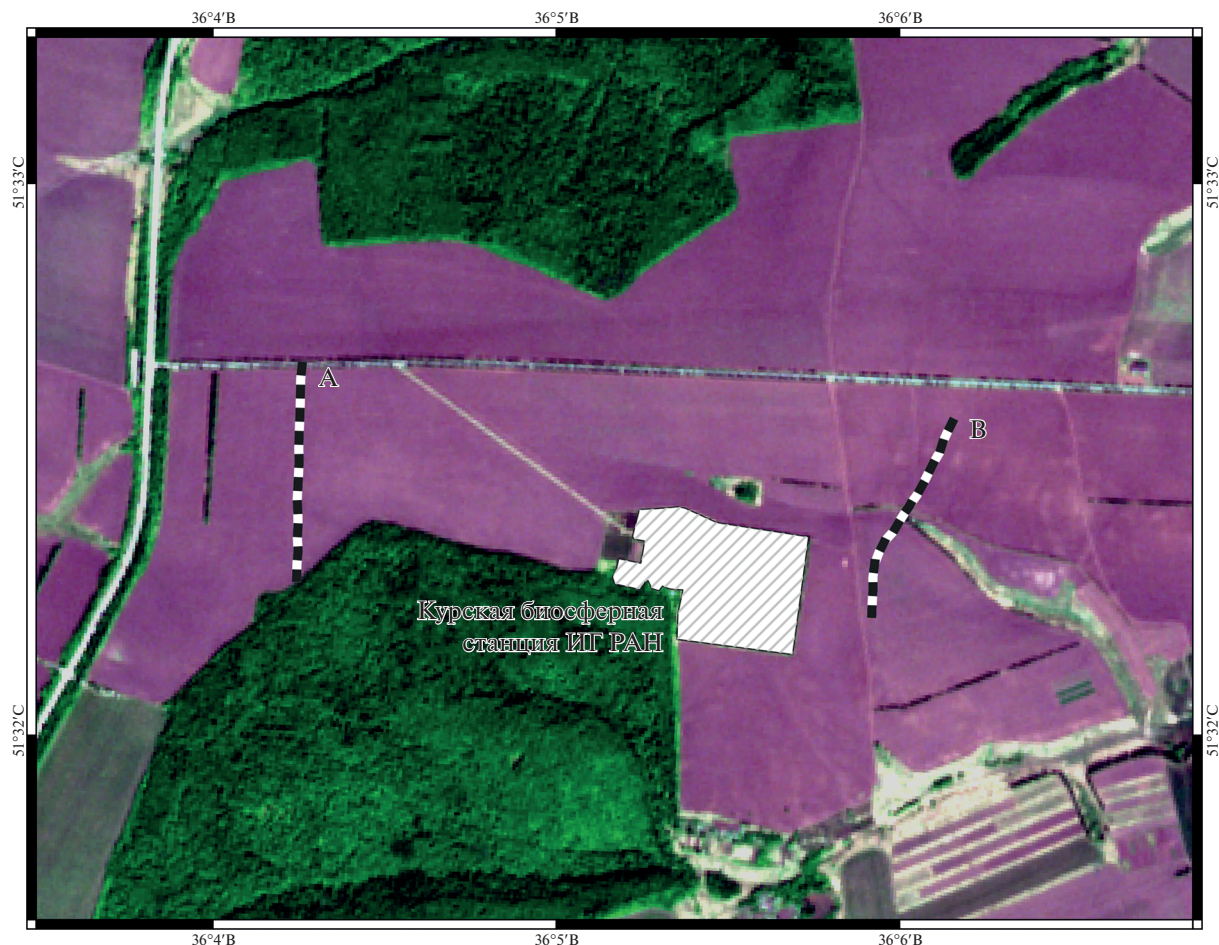
## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

### *Объекты и район исследований*

Комплекс наземных полевых исследований был проведен в окрестностях Курской биосферной станции Института географии РАН (КБС ИГ РАН), расположенной в Медвенском районе Курской области. Участок сбора полевых данных расположен в лесостепном ландшафте с высокой аграрной освоенностью и представляет собой старопахотные (более 200 лет) земли с различными сельскохозяйственными культурами, общей площадью 350 га, ограниченные широколиственным лесным массивом, лесополосами вдоль автомобильных дорог, овражно-балочной сетью и сельским поселением (рис. 1). Пашни занимают 57% территории, леса 17%, луга 10%, участки лесостепи, балки и овраги 12%, селитебные территории и дороги 4%. Почвы на пашнях и на окружающих их степных и залежных участках в основном относятся к группе типичных черноземов (Haplic Chernozem (Loamic, Pachic)) (IUSS..., 2015). Климат в районе исследований умеренно-континентальный. По данным расположенной вблизи участка наблю-

<sup>1</sup> <https://www.ars.usda.gov/midwest-area/west-lafayette-in-national-soil-erosion-research/docs/usle-database/usle-history/>





**Рис. 1.** Космический снимок Sentinel-2 (10 мая 2018 г., синтез в натуральных цветах), на основе которого производился расчет спектральных характеристик методом главных компонент. Косая штриховка – территория Курской биосферной станции ИГ РАН, пунктирные линии – трансекты А и В.

дений метеостанции Центрально-Черноземного заповедника им. В.В. Алехина, климатические нормы (за период 1991–2020 гг.) составляют для среднегодовой температуры воздуха  $+7.1^{\circ}\text{C}$ , для среднегодового количества осадков 637 мм; снежный покров мощностью до 50 см наблюдается с ноября по март. Значение среднемноголетнего гидротермического коэффициента (ГТК Селянинова) в сезон активной вегетации соответствует нормальным условиям увлажнения.

Для выполнения поставленных задач на основе оцененного по данным Д33 LS-фактора были заложены две контрастные по этому показателю трансекты (катены) (см. рис. 1 и 2).

Трансекта А ( $36^{\circ}04'15.35''$  в.д.,  $51^{\circ}32'38.49''$  с.ш.;  $36^{\circ}04'14.13''$  в.д.,  $51^{\circ}32'17.93''$  с.ш.) расположена к западу-северу от КБС ИГ РАН, направлена линейно с севера на юг, находится в плакорной части с низкими углами наклона местности (максимальный угол наклона  $2.8^{\circ}$ , в среднем  $0.8^{\circ}$ ). На момент исследований проходила через посевы сои

(фаза бутонизации, высота растений 20–25 см). Протяженность трансекты 1142 м, максимальный перепад высоты 6.1 м. Общее количество точек отбора проб составило 17, среднее расстояние между ними 67.2 м.

Трансекта В ( $36^{\circ}06'01.62''$  в.д.,  $51^{\circ}32'13.17''$  с.ш.;  $36^{\circ}06'09.18''$  в.д.,  $51^{\circ}32'33.99''$  с.ш.) была заложена вдоль наиболее выраженного местного рельефа (максимальный угол наклона  $9^{\circ}$ , средний  $3.9^{\circ}$ ) и расположена к востоку и северо-востоку от КБС ИГ РАН. Проходит через поле подсолнечника (фаза бутонизации, высота растений 100–120 см), пересекает относительно крутой северный склон, на котором формируется выраженная сеть мелких канавок в результате дождевой эрозии, и спускается в днище ложбины. Протяженность трансекты 1144 м, максимальный перепад высоты 23.5 м. Общее количество точек отбора проб составило 21, среднее расстояние между ними 54.5 м.

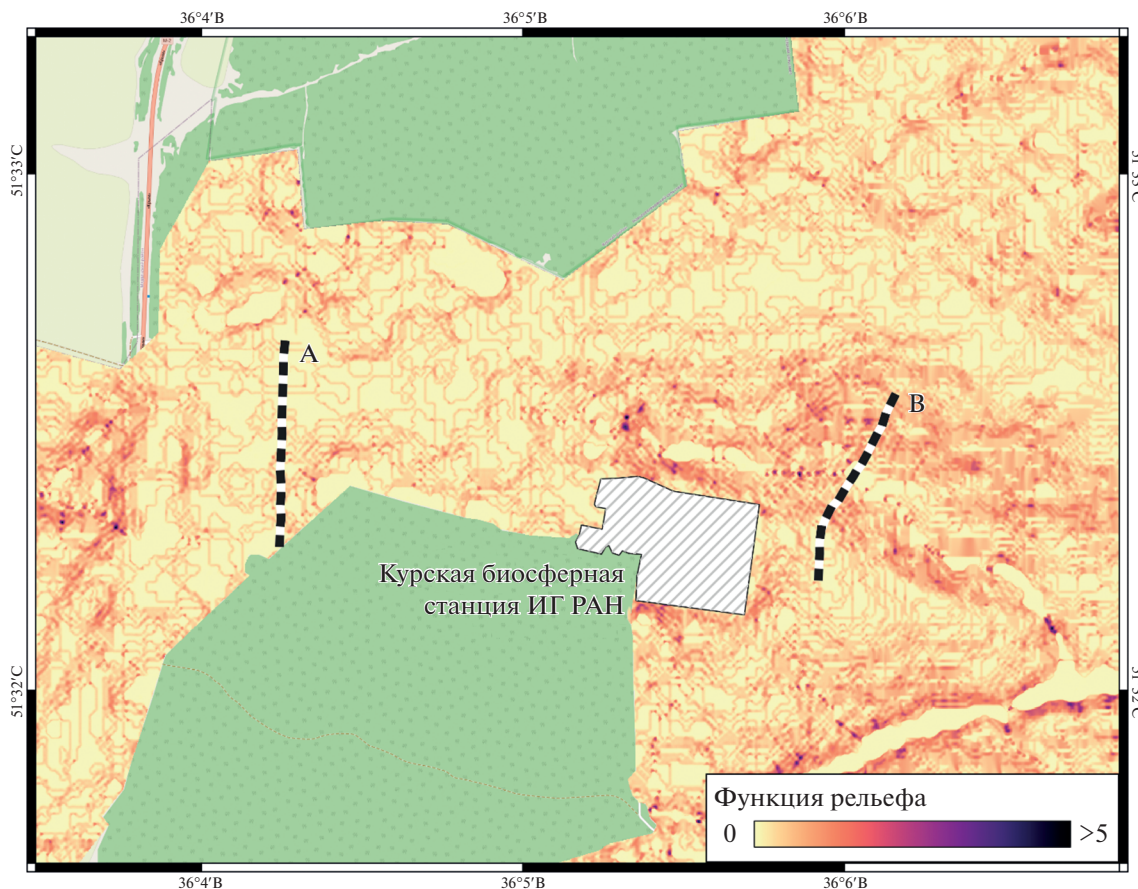


Рис. 2. Картограмма LS-фактора исследуемого участка. Большие значения соответствуют более высокой эрозионной опасности. В качестве картографической основы использованы карты OSM (© Участники OpenStreetMap). Обозначения: см. подпись к рис. 1.

#### Методы дистанционного зондирования

В качестве исходных данных для расчета LS-фактора исследуемой территории использовалась цифровая модель рельефа (ЦМР) на основе данных SRTM<sup>2</sup> с размером ячейки 30 м. Расчет производился в модуле SAGA GIS “Basic Terrain Analysis” по методу Moore et al. (1991)<sup>3</sup>:

$$LS = (n + 1) \left( \frac{A_s}{22.13} \right)^n \left( \frac{\sin \beta}{0.0896} \right)^m, \quad (1)$$

где  $n = 0.4$ ,  $m = 1.3$ ,  $A_s$  – площадь территории водосбора,  $\beta$  – угол склона.

Размер ячейки полученной картограммы LS-фактора соответствует исходной модели рельефа и составляет 30 м.

В качестве источника спектральных характеристик поверхности почвы использовался сни-

мок Sentinel-2B<sup>4</sup> за 10.05.2018, характеризующийся визуальной однородностью полей заложения трансект в различных синтесах видимых (RGB), крайних красных (Red Edge) и ближнего инфракрасного (NIR) каналов. Характеристики каналов приведены в табл. 1. Для уменьшения размерности данных (переход от многоканального изображения к единственному спектральному показателю) применялся метод главных компонент (Principal Component Analysis, PCA). Расчеты проводились в модуле SAGA GIS “Principal Component Analysis”<sup>5</sup>.

#### Полевые и лабораторные методы

Полевая методика состояла в отборе проб (27–29 июня 2020 г.) ручным почвенным буром вдоль выбранных линейных трансект. Пробы отбирались в среднем через каждые 60 м из пахотного горизонта с глубины 0–12 см и из подпахотного го-

<sup>2</sup> <https://www2.jpl.nasa.gov/srtm/> (дата обращения 14.06.2021).

<sup>3</sup> [http://www.saga-gis.org/saga\\_tool\\_doc/7.3.0/ta\\_compound\\_0.html](http://www.saga-gis.org/saga_tool_doc/7.3.0/ta_compound_0.html) (дата обращения 14.06.2021).

<sup>4</sup> <https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser> (дата обращения 14.06.2021).

<sup>5</sup> [http://www.saga-gis.org/saga\\_tool\\_doc/7.3.0/statistics\\_grid\\_8.html](http://www.saga-gis.org/saga_tool_doc/7.3.0/statistics_grid_8.html) (дата обращения 14.06.2021).

**Таблица 1.** Характеристики использованных спектральных каналов Sentinel-2

Номер	Категория	Центральная длина волны, нм	Ширина, нм	Пространственное разрешение, м
2	Blue	492.1	66	10
3	Green	559.0	36	10
4	Red	665.0	31	10
5	Vegetation red edge	703.8	16	20
6	Vegetation red edge	739.1	15	20
7	Vegetation red edge	779.7	20	20
8	NIR	833.0	106	10

ризонта с глубины 25–33 см. Всего на двух трансектах было отобрано 76 образцов с влажной массой 300–400 г. В каждой точке отбора почвенных образцов дополнительно определяли с помощью GPS географические координаты (с точностью до 3 м), ориентацию и угол склона в направлении трансекты, а также относительную влажность почвы (NH2 Moisture Meter с датчиком ThetaProbe ML2x; Delta-T Devices Ltd., Великобритания). Угол склона оценивался с помощью приложения Google Play “Пузырьковый уровень”, с точностью до 0.1°. Для этого компьютерный планшет помещался в центр ровной деревянной панели размером 40 на 200 см, плотно уложенной на поверхность почвы в точке отбора. Влажные образцы почвы взвешивали с точностью до 0.01 г, укладывали тонким слоем на крафтовой бумаге и сушили в комнатных условиях (22°C, относительная влажность воздуха 30%) до постоянной воздушно-сухой массы; затем вручную отбирали крупные камни и корни и просеивали почву через сито с размером ячеек 2 мм.

Лабораторный анализ и эксперименты с образцами проводились 1–15 августа 2020 г. Первоначально из хорошо перемешанных воздушно-сухих образцов отбирались навески, которые досушивали в термостате до постоянной массы при 110°C. Эти навески служили для определения исходного содержания влаги в образцах. Затем каждую абсолютно-сухую навеску делили на две части: в первой ее части в двукратной повторности определялось содержание  $S_{орг}$  и общего N с помощью CNHS анализатора Elementar Vario EL, на базе химической лаборатории Института географии РАН. С помощью второй части навески, перед началом проведения экспериментов по оценке микробной активности почвы, определялась предельная полевая влагоемкость (ППВ). Для этой цели использовали 50 мл пластиковые пробирки для центрифуги с перфорированным (отверстия 0.5 мм) коническим дном и герметичными крышками, в которые помещали ок. 30 г почвы. Затем каждую пробирку с навеской взвешивали с точностью до 0.01 г. В эти пробирки

пипеткой постепенно заливали дистиллированную воду до предельного влагонасыщения. После этого пробирки закрывали крышками и оставляли в штативе до полного стекания воды через нижние отверстия пробирок. После этого пробирки снова взвешивали. ППВ оценивали по максимальной массе влаги, удержанной пробой, в пересчете на грамм абсолютно-сухой почвы.

Перед началом измерений эмиссии  $CO_2$  новые навески (ок. 40 г), взятые из исходных воздушно-сухих проб, помещали в стеклянные флаконы объемом 200 мл и взвешивали их с точностью до 0.01 г. Затем для всех воздушно-сухих навесок (76) проводили измерения начального уровня дыхания. В эти флаконы автоматическими пипетками добавляли расчетное количество дистиллированной воды (точность: 10 мкл) для доведения влажности навесок почвы до 90% от ППВ, за вычетом объема воды равного 1 мл/10 г абс. сух. почвы. Это количество позднее замещали 1 мл 10% раствора глюкозы при оценке субстрат-индуцированного микробного дыхания. В результате образцы перед предварительной культивацией получали 60–65% объемную влажность, что считается оптимальным для роста почвенных микробов. На этапе предварительной инкубации перед измерениями эмиссии  $CO_2$  флаконы прикрывали тонкой полиэтиленовой пленкой и выдерживали в темноте 5–6 сут при 22°C и относительной влажности воздуха 30%.

Выраженность “эффекта Бирча”<sup>6</sup> оценивали по соотношению начальной скорости эмиссии  $CO_2$  в воздушно-сухих образцах и через 10 мин после доведения образцов до 60–65% объемной влажности. Сами измерения эффекта проводили в течение 5 мин. После периода предварительной инкубации флаконы герметично закрывали резиновыми пробками и проводили измерение ба-

<sup>6</sup> “Эффект Бирча” – скачкообразное, но непродолжительное усиление эмиссии из почвы диоксида углерода в результате ее увлажнения после периода засухи. Используется как один из показателей общей микробной активности почвы (Karelin et al., 2017).

зального микробного дыхания в течение 10 мин. Измерение субстрат-индуцированного дыхания проводилось через 2 ч после добавления расчетного количества 10% раствора глюкозы в образцы и доведения их влажности до 90% от ППВ. Полученная концентрация, как найдено эмпирически, находится в пределах оптимума для максимального роста большинства почвенных микроорганизмов (Anderson and Domsch, 1978). Измерения эмиссии CO<sub>2</sub> из почвенных образцов проводили в 200 мл флаконах с помощью высокоточного (0.1 ppm) инфракрасного газоанализатора LiCor-850 (Небраска, США). Скорость эмиссии рассчитывали по уравнению Клапейрона–Менделеева по изменению концентрации диоксида углерода за время экспозиции для известного объема, температуры и давления с последующим пересчетом на массу образцов.

Уравнение для расчета потока углерода в составе базального ( $V_{basal}$  (или субстрат-индуцированного,  $V_{sir}$ ) микробного дыхания выглядит следующим образом:

$$V_{basal} (V_{sir}) \left( \frac{\text{мкг С}}{\text{г} \cdot \text{ч}} \right) = \frac{\Delta \cdot 12 \cdot V \cdot P}{0.0821(273 + t) T \cdot m}, \quad (2)$$

где  $\Delta$  – изменение объемной концентрации в камере за время экспозиции (ppm),  $P$  – атмосферное давление (атм.),  $V$  – объем измерительной системы (л),  $t$  – температура (°C),  $T$  – время экспозиции (ч),  $m$  – масса абс. сухой навески (г).

На основе полученных данных оценивали микробную биомассу согласно линейному регрессионному уравнению для температуры 22°C (Anderson, Domsch, 1978):

$$C_{mic} \left( \frac{\text{мг С}}{1 \text{ г почвы}} \right) = 40.04 V_{sir} + 0.37, \quad (3)$$

где  $V_{sir}$  выражен в мкл CO<sub>2</sub> г<sup>-1</sup> ч<sup>-1</sup>. Дополнительно рассчитывали метаболические коэффициенты: MET1 ( $V_{basal}/V_{sir}$ ) и MET2 ( $V_{basal}/C_{mic}$ ). Первый коэффициент отражает степень вовлечения микрофлоры в разложение органического вещества, а второй – доступность субстрата для микробного сообщества (Ивашенко, 2018; Ananyeva et al., 2008).

#### Статистический анализ

Для статистического анализа были использованы следующие наземные характеристики: пахотный/подпахотный горизонт; возделываемая сельскохозяйственная культура; содержание органического углерода (C, %); содержание общего азота (N, %); отношение C : N; исходная объемная влажность почвы (MOIST, %); угол склона (SLOPE, °); микробная биомасса ( $C_{mic}$ , мкг С г<sup>-1</sup> абс. сух. почвы), базальное дыхание микроорганизмов ( $V_{basal}$ , мкг С г<sup>-1</sup> абс. сух. почвы в час), субстрат-инду-

цированное дыхание микроорганизмов ( $V_{sir}$ , мкг С г<sup>-1</sup> абс. сух. почвы в час); степень усиления микробного дыхания в результате эффекта Бирча ( $V_{birch}$ ) по сравнению с базальным (BIRCH), степень усиления субстрат-индуцированного дыхания по сравнению с базальным (SID); а также микробные метаболические коэффициенты  $V_{basal}/V_{sir}$  (MET1),  $V_{basal}/C_{mic}$  (MET2, мкг С/мг  $C_{mic}$  ч<sup>-1</sup>).

Для оценки связи спектральных характеристик почвы с крутизной склона и рассматриваемыми физико-химическими и биологическими характеристиками почвы для каждой полевой точки методом PCA были проведены расчеты для двух комбинаций каналов используемого снимка Sentinel-2:

- RGB и NIR;
- RGB, Red Edge и NIR.

С помощью метода PCA для всех исследуемых характеристик почвы были выделены группы связанных между собой переменных. PCA проводился на основе корреляционных матриц, пропущенные значения восстанавливались методом итерационного заполнения. Статистический анализ проводился в 4 вариантах:

- 1) по всем данным без учета глубины слоя почвы;
- 2) отдельно для пахотного слоя;
- 3) отдельно для подпахотного слоя;
- 4) по всем данным методом внутригрупповой нормализации.

PCA, корреляционный и регрессионный анализы проводили в статистическом пакете SPSS 27. Оценивали коэффициенты корреляции Пирсона ( $r_p$ ). Коэффициент вариации (CV, %) рассчитывали, как отношение стандартного отклонения к среднему значению. Сравнение средних проводили на основе непараметрического критерия Манна–Уитни (Mann–Whitney  $U$  test) для  $p = 0.05$ .

#### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Сводка различий средних наблюдаемых наземных показателей между двумя сравниваемыми трансектами приведена в табл. 2. Как следует из приведенных значений, трансекта А является значимо более пологой. Средний угол склона составляет здесь 0.8°, что существенно меньше, чем для трансекты В ( $4 > 0.8^\circ$ ,  $p < 0.01$ ). Медианное значение рассчитанного LS-фактора составляет для трансекты А – 0.033, для трансекты В – 0.51. При этом почва трансекты А содержала значимо больше влаги ( $10.4 > 6.4\%$ ,  $p < 0.01$ ), больше углерода и азота, а также имела более выгодное для микробиоты соотношение C : N и в 1.5 раза

<sup>7</sup> <https://www.ibm.com/ru-ru/analytics/spss-statistics-software> (дата обращения 14.06.2021).

**Таблица 2.** Сравнительные характеристики трансект на типичных черноземах

Трансекта	SLOPE, Град.	MOIST, %	MET1	MET2	$C_{mic}$	BIRCH	SID	$V_{basal}$	C, %	N, %	C : N
Данные по горизонтам объединены											
A	<b>0.8</b>	<b>10.6</b>	<b>0.105</b>	<b>1.40</b>	<b>508.1</b>	11.91	<b>11.13</b>	0.69	<b>3.61</b>	<b>0.28</b>	<b>13.04</b>
B	<b>4</b>	<b>4.4</b>	<b>0.220</b>	<b>2.88</b>	<b>329.4</b>	11.5	<b>7.79</b>	0.74	<b>3.36</b>	<b>0.25</b>	<b>13.29</b>
Пахотный горизонт											
A	<b>0.8</b>	<b>9.52</b>	<b>0.10</b>	<b>1.34</b>	<b>551.5</b>	12.13	<b>11.08</b>	0.70	<b>3.71</b>	<b>0.29</b>	<b>12.92</b>
B	<b>4</b>	<b>4.4</b>	<b>0.194</b>	<b>2.55</b>	<b>339.8</b>	12.57	<b>8.61</b>	0.69	<b>3.42</b>	<b>0.26</b>	<b>13.32</b>
Подпахотный горизонт											
A	<b>0.8</b>	<b>8.8</b>	<b>0.115</b>	<b>1.44</b>	<b>464.6</b>	<b>12.21</b>	<b>10.75</b>	<b>0.67</b>	<b>3.58</b>	<b>0.28</b>	<b>13.07</b>
B	<b>4</b>	<b>4.4</b>	<b>0.24</b>	<b>3.18</b>	<b>319.4</b>	<b>10.54</b>	<b>7.04</b>	<b>0.80</b>	<b>3.31</b>	<b>0.25</b>	<b>13.25</b>

*Примечание.* Приведены средние значения. Все значимые ( $p < 0.05$ ) попарные различия между трансектами выделены полужирным шрифтом. Описание переменных и единиц измерения приведено в тексте.  $n = 17$  для трансекты А,  $n = 21$  для трансекты В, за исключением переменных С, N, C : N (с учетом повторностей для них  $n = 34$  и  $42$  соответственно).

большую биомассу микроорганизмов ( $508.1 > 329.4$  мкг С г<sup>-1</sup>,  $p < 0.01$ ).

В обоих горизонтах диапазон изменчивости содержания органического углерода составил 2.51–3.94% ( $CV = 7.7\%$ ); общего азота 0.17–0.31% ( $CV = 10.3\%$ ); соотношение C : N менялось от 12.06 до 14.99 ( $CV = 4.6\%$ ). Таким образом, можно заключить, что вариабельность анализируемых химических показателей была относительно низкой. В то же время наземные оценки угла склона ( $0^\circ$ – $8.2^\circ$ ,  $CV = 85\%$ ), остаточной объемной влажности почвы (4.4–10.6%,  $CV = 45\%$ ), равно как и экспериментально оцененные показатели микробной активности почвенных проб, варьировали намного заметнее. Это относится к базальному дыханию (0.13–1.95 мкг С г<sup>-1</sup> абс. сух. почвы ч<sup>-1</sup>,  $CV = 51.6\%$ ), субстрат-индуцированному дыханию (1.48–11.4 мкг С г<sup>-1</sup> абс. сух. почвы ч<sup>-1</sup>,  $CV = 39.4\%$ ) и усилению выделения CO<sub>2</sub> в результате эффекта Бирча ( $CV = 41.7\%$ ).

В результате обработки полевых и лабораторных данных была построена общая корреляционная матрица (табл. 3), где в качестве зависимых переменных могут выступать перечисленные выше почвенные характеристики, а в качестве независимой переменной – крутизна склона. Как видно из полученных данных, содержание углерода обратно зависит от крутизны ( $r_p = -0.49$ ,  $p < 0.0001$ ), которая служит средним по силе предиктором; такая же связь показана и для азота ( $r_p = -0.48$ ,  $p < 0.0001$ ). Соотношение C : N смещалось в сторону преобладания углерода на участках с большим углом склона, что менее выгодно для роста растений и микробиоты. Связь между крутизной склона и содержанием углерода в пахотном горизонте выше, чем в подпахотном ( $r_p = -0.54 > -0.47$ ).

Помимо угла склона значимые положительные связи содержания углерода были показаны с объемной влажностью почвы ( $r_p = +0.36$ ,  $p < 0.01$ ), содержанием общего азота ( $+0.91$ ,  $p < 0.01$ ), а также с  $V_{sir}$  ( $+0.50$ ,  $p < 0.01$ ),  $C_{mic}$  ( $+0.54$ ,  $p < 0.01$ ) и  $V_{birch}$  ( $+0.40$ ,  $p < 0.01$ ), что позволяет использовать содержание углерода в качестве предиктора для оценки связанных с ним характеристик почвы.

С увеличением крутизны склона достоверно падает содержание воды в почве ( $r_p = -0.47$ ,  $p < 0.01$ ), снижается присутствие микроорганизмов ( $-0.43$  ( $C_{mic}$ ),  $p < 0.01$ ), а также снижается их реакция на внесение биогенных веществ (раствора глюкозы) ( $-0.42$  ( $V_{sir}$ ),  $p < 0.01$ ). Таким образом, биомасса микробов оказалась в 1.5 раза выше в почве с лучшими физико-химическими характеристиками, и это микробное сообщество демонстрировало менее активный отклик на улучшение условий питания. Это показывает, что даже при относительно небольшой крутизне склона (медиана угла для обеих трансект составляет  $2^\circ$ , что соответствует уклону в 3.5%; обычно диапазон в подобных исследованиях находится в пределах 0–20% (Mondal et al., 2017)), и на таких гигроскопичных почвах с мощным гумусовым горизонтом, как типичные черноземы, характер мезорельефа может существенно влиять на их характеристики. Это влияние, вероятно, в большей степени реализуется через водную эрозию, так как для образцов почвы, отобранных на участках с большей крутизной склона, не отмечено значимого изменения скорости выделения CO<sub>2</sub> из верхнего горизонта почвы, а эоловое или механическое перераспределение почвенных частиц слабо влияет на химический состав верхнего слоя почвы из-за наличия в местных черноземах мощного гумусового горизонта [55–80 см (Люри и др., 2010)]. О ведущем участии водной эрозии в дегра-

**Таблица 3.** Корреляционная матрица анализируемых наземных характеристик пахотных типичных черноземов

	SLOPE	MOIST	C	N	C : N	$V_{basal}$	$V_{sir}$	$V_{birch}$	$C_{mic}$	BIRCH	SID	MET1	MET2
SLOPE	1	-.470**	-.488**	-.475**	.257*	.299**	-.422**	-.213	-.434**	-.179	-.372**	.361**	.367**
MOIST		76	76	76	76	75	75	74	74	73	74	74	73
		1	.362**	.347**	-.154	-.271*	.562**	.097	.547**	.098	.521**	-.354**	-.355**
C			76	76	76	75	75	74	74	73	74	74	73
			1	.912**	-.435**	.007	.501**	.401**	.543**	.162	.234*	-.188	-.198
N				76	76	75	75	74	74	73	74	74	73
				1	-.748**	.096	.506**	.389**	.522**	.083	.174	-.111	-.112
C : N					76	75	75	74	74	73	74	74	73
					1	-.220	-.291*	-.202	-.267*	.082	.005	-.094	-.108
$V_{basal}$						75	75	74	74	73	74	74	73
						1	-.087	.080	-.084	-.595**	-.687**	.714**	.733**
$V_{sid}$							74	73	73	73	74	74	73
							1	.281*	1.000**	.032	.543**	-.561**	-.557**
$V_{birch}$									74	72	74	74	73
									.281*	.561**	.011	-.203	-.194
$C_{mic}$									73	73	72	72	72
									1	.032	.529**	-.560**	-.557**
BIRCH										72	73	73	73
										1	.560**	-.482**	-.490**
SID											72	72	72
											1	-.709**	-.719**
MET1												74	73
												1	.999**
MET2													73
													1

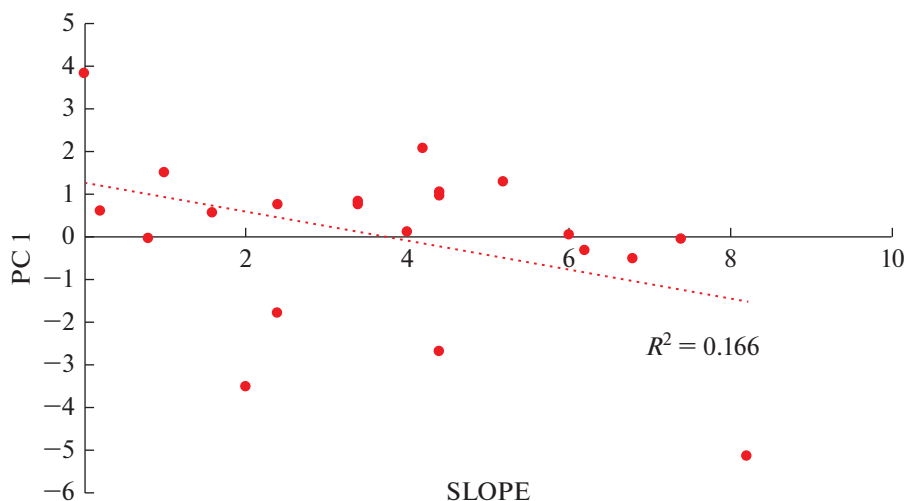
*Примечание.* Данные по пахотному и подпахотному горизонтам объединены. Обозначения переменных соответствуют табл. 2. Описание переменных приведено в тексте. \* – корреляции значимые при  $p = 0.05$ , \*\* – при  $p = 0.01$ . В нижних строках, под коэффициентами корреляции, приведено количество значений.

дации почвы свидетельствуют и специальные исследования агрочерноземов (Плотникова, 2020; Suleymanov et al., 2021).

Полученные экспериментально значения микробного метаболического коэффициента  $V_{basal}/C_{mic}$  (MET2) также отражают ухудшение состояния почвы при увеличении крутизны склона. На трансекте В его величина значимо выше как для пахотного, так и подпахотного горизонтов (см. табл. 2), что говорит о более напряженном метаболизме микробиоты и менее благоприятных условиях питания (Ивашенко, 2017) с увеличением крутизны. Это отражает и положительный коэффициент корреляции этого показателя с крутизной склона ( $r_p = +0.37$ ,  $p < 0.05$ ; см. табл. 3). В то же время коэффициент  $V_{basal}/V_{sir}$  (MET1) продемонстрировал обратное различие: он оказался в пределах нижней границы нормы на трансекте В (0.220), но значимо более низким на более поло-

гой трансекте А (0.105), что, напротив, говорит в пользу несколько лучших условий микробного питания на склонах. Непосредственной причиной таких значений коэффициента MET1 является значимо не различающийся между трансектами уровень базального дыхания на фоне существенно более низкой биомассы микробов на наклонной трансекте. Такие результаты не находят однозначного объяснения. В частности, это может быть связано с влиянием разных посевных культур (соя и подсолнечник) и приемов их обработки на сравниваемых трансектах. Тем не менее для нашего исследования важно то, что различия по этому метаболическому коэффициенту между трансектами, заложенными на участках с разной крутизной склона, оказались значимы, как и для других показателей.

То же касается обнаруженной в нашем случае слабой, но положительной связи между крутиз-



**Рис. 3.** Корреляция между главной компонентой PC 1 (см. табл. 4), отражающей состояние микробиоты почвы, и углом склона (SLOPE, °) для пахотного горизонта на основе наблюдений за различными по состоянию эрозии участками типичных черноземов (Курская обл., Медвенский район, июнь 2020).

ной склона и базальным дыханием ( $r_p = +0.30$ ,  $p < 0.01$ ). Как правило, более подверженные факторам деградации почвы, в частности черноземы, демонстрируют ослабленное дыхание (Плотникова, 2020; Сушко, 2019; Suleymanov et al., 2021). Однако в нашем случае этого не наблюдалось, что, вероятно всего, связано с относительно невысокой степенью деградации почвы в пределах трансект. Гораздо лучше это отражают показатели  $C_{mic}$  и MET2, которые поэтому предпочитают в подобных исследованиях (Ивашенко, 2017).

Попытки связать крутизну склона и спектральные характеристики, полученные на основе данных ДЗЗ, показали, что наилучший результат во всех случаях достигается при использовании каналов RGB и NIR и метода “sums-of-squares-

and-cross-products matrix”. В этом сочетании положительная корреляция спектральных характеристик с углом склона местности составляет от +0.50 до +0.60 ( $p < 0.01$ ). Корреляция спектральных характеристик с содержанием углерода и азота в почве оказалась существенно лучше для подпахотного горизонта при использовании каналов RBG, Red Edge и NIR: от  $-0.41$  до  $-0.70$  ( $p < 0.01$ ). При этом различий между статистическими методами расчета не наблюдалось.

При группировке переменных, отражающих характеристики почвы, с помощью метода PCA были выделены три главных компоненты. Первая в основном описывает микробную составляющую (переменные  $V_{sir}$ ,  $V_{birch}$ ,  $C_{mic}$ , MET1 и MET2) и объясняет около половины дисперсии всех исходных данных (47.8%). Вторая компонента во всех вариантах, кроме четвертого (см. раздел “Статистический анализ”), включает общие характеристики почвы (C, N, базальное дыхание). Третья – включает разные наборы переменных и отвечает за существенно меньшую долю вариации. С углом склона местности (SLOPE) несильно, но достоверно коррелирует лишь первая компонента (рис. 3, табл. 4), при этом крутизна склона самостоятельно объясняет от 10% (в подпахотном слое) до 16% (в пахотном горизонте) ее изменчивости.

Дополнительно проведенный для наземных переменных множественный линейный пошаговый регрессионный анализ показал, что наилучшую объясняющую способность демонстрирует модель, где в качестве зависимой переменной используется  $V_{sir}$ , а в качестве независимых – оставшиеся количественные переменные (см. общий список в разделе “Материалы и методы”). В этом случае модель объясняет 42% дисперсии ( $r^2 =$

**Таблица 4.** Результаты анализа почвенных характеристик методом главных компонент для пахотного горизонта типичных черноземов

Фактор	PC 1	PC 2	PC 3
C	0.179	<b>0.567</b>	-0.277
N	0.122	<b>0.612</b>	-0.201
$V_{basal}$	-0.197	0.220	<b>0.680</b>
$V_{sid}$	<b>0.434</b>	-0.002	<b>0.411</b>
$V_{birch}$	<b>0.389</b>	0.306	0.064
$C_{mic}$	<b>0.434</b>	-0.002	<b>0.411</b>
MET1	<b>-0.440</b>	0.283	0.190
MET2	<b>-0.439</b>	0.285	0.206
% объясненной вариации	47.8	27.3	18.6

*Примечание.* Полу жирным шрифтом выделены наиболее значительные факторные нагрузки.

$= 0.42$ ,  $F = 26.2$ ,  $p < 0.0001$ ,  $\beta = 0.436$  (MOIST),  $0.349$  (N)). Такую же объясняющую способность имеет модель, где зависимой переменной является микробная биомасса  $C_{mic}$  ( $r^2 = 0.42$ ,  $F = 25.2$ ,  $p < 0.0001$ ;  $\beta = 0.388$  (C),  $0.384$  (MOIST)), что естественно, так как эта переменная рассчитывается на основе линейной зависимости (2) от  $V_{sir}$ .

В случае, когда независимой переменной служит содержание органического углерода в почве, практический интерес представляет оценка его зависимости от угла склона местности, а не предсказание с помощью других почвенных характеристик (например, содержания азота или скорости эмиссии  $CO_2$ ), что, по сути, требует того же набора химических анализов или не менее сложных лабораторных газометрических процедур. Такие предикторы содержания углерода в почве, как угол склона местности, который был получен по наземным данным, и LS-фактор, оцениваемый на основе данных ДЗЗ, имеют одинаковый вклад в регрессионную модель и могут быть в ней взаимозаменяемы. В частности, регрессионная зависимость, построенная для оценки содержания углерода в пахотном горизонте (C, %) от среднего значения LS-фактора в пределах 10 м от точек отбора проб по обеим трансектам (LS), позволяет объяснить 30% наблюдаемой дисперсии:

$$C(\%) = 3.72 - 0.673LS, \quad (4)$$

$$r^2 = 0.3, \quad F = 15, \quad p < 0.001, \quad n = 38.$$

Относительно невысокая объясняющая способность регрессии ( $r^2 = 0.30$ ) в основном связана с небольшим разбросом данных, использованных для построения уравнения, поскольку они получены только для двух пашен и одного варианта почвы. LS-фактор по двум трансектам варьировал существенно ( $CV = 75.9\%$ ), однако содержание углерода в исследованных почвенных образцах пахотного горизонта менялось в диапазоне  $2.97\text{--}3.91\%$  ( $CV = 6.8\%$ ), что намного меньше по сравнению с обычно используемыми в моделировании на основе ДЗЗ диапазонами этого показателя ( $0.03\text{--}3.2\%$ ,  $CV = 30\%$ ; оценка выполнена по данным обзора (Lamichhane et al., 2019)). Тем не менее, полученная между этими величинами средняя по силе обратная связь ( $r_p = -0.55$ ,  $p = 0.01$ ) показывает, что даже в таком крупном пространственном масштабе последний фактор может оказывать значимое влияние. Кроме того, размер ячейки, использованной для расчетов цифровой модели рельефа, не позволяет более точно привязать на местности точки отбора проб к значениям LS-фактора.

**Сопоставление полученных результатов с литературными данными.** С опубликованными данными можно сравнить отдельные почвенные показатели по старопахотным типичным черноземам

(содержание углерода, состояние микробиоты) и точность моделей ДЗЗ, предсказывающих содержание  $C_{орг}$  в сходном масштабе.

Содержание почвенного углерода определялось в районе исследований множеством авторов для различных целей (Ивашенко, 2017; Люри и др., 2010; Мамонтов и др., 2016; Плотникова, 2020; Сушко, 2019). Это связано с тем, что здесь расположен Центрально-Черноземный заповедник им. В.В. Алехина, обладающий уникальными участками эталонных лесостепных экосистем на типичных черноземах, в том числе с разным режимом использования, что позволяет проводить сравнения. В частности, в аналоговой серии залежей (Люри и др., 2010), описанной по единичным разрезам, для верхнего горизонта постоянных пашен приводится значение  $C_{орг} = 3.19\%$ ; для сравнения, на 58-летней залежи в том же слое оно составляет  $3.73\%$ . Наблюдаемая по нашим данным пространственная вариация содержания  $C_{орг}$  на отдельных пашнях охватывает весь диапазон изменчивости сукцессионного ряда, описываемого в цитируемой работе. Мамонтов с соавторами (2016) в том же районе изучали различные по размеру агрегаты агрочернозема типичного и пришли к выводу, что старопахотные почвы под беспрерывной озимой пшеницей содержат на  $20\text{--}30\%$  меньше углерода по сравнению с целиной. При этом средневзвешенное содержание  $C_{орг}$ , рассчитанное по авторским данным, составляет  $3.22\%$  (диапазон:  $3.07\text{--}4.12\%$ ). В нашей работе средний показатель оказался сходным ( $3.47\%$ ) при диапазоне  $2.51\text{--}3.90\%$ . Ивашенко (2017) также отмечает, что значения  $C_{орг}$  были ниже на пашнях по сравнению с целинными аналогами ( $2.7\%$  на пашнях против  $4.2\text{--}4.5\%$  в целинной степи). В указанных исследованиях, за исключением Мамонтова с соавторами (2016), фактически не оценивалась пространственная вариация  $C_{орг}$  на пашнях и в других экосистемах. Приведенные сравнения с нашими данными демонстрируют выраженную вариабельность  $C_{орг}$  в зависимости от фактора склона, что в нашем случае проявляется даже на относительно небольшом по площади пахотном участке.

Известно, что микробная биомасса почвы и ее базальное дыхание служат интегральными показателями продуктивности и общего состояния экосистем и их почв (Singh and Gupta, 2018 и др.), а оценки запасов микробной биомассы достаточно постоянны в разных экосистемах в ходе вегетационного сезона (Сушко, 2019), поэтому их удобно использовать в качестве биологического индикатора состояния почв. Оценки микробной активности различных экосистем на типичных черноземах, полученные другими исследователями в том же районе аналогичными лабораторными методами, предоставляют хороший материал



для сравнения с нашими результатами. В частности, в работе Ивашенко (2017) на пашне (ячмень) базальное дыхание менялось в пределах 0.4–0.62 мкг С г<sup>-1</sup> ч<sup>-1</sup> (максимальная величина отмечена для заповедных целинных степей 0.73–1.56, минимальная – для урбаноземов), а микробная биомасса – от 221 до 473 мкг С г<sup>-1</sup> (максимальные значения были получены для некосимой степи: 1954 мкг С г<sup>-1</sup>). В том же исследовании показатель микробного метаболизма  $V_{basal}/C_{mic}$  менялся в среднем от 0.57 (некосимые степи) до 6.83 (урбаноземы г. Курска), составляя для пашен 1.26–1.90 мкг С/мг  $C_{mic}$  ч<sup>-1</sup>. Наши данные демонстрируют широкие пространственные вариации запасов микробиоты (114.1–854.5 мкг С г<sup>-1</sup>) и уровня ее метаболизма (0.49–13.20 мкг С/мг  $C_{mic}$  ч<sup>-1</sup>) в верхнем слое старых пашен, хотя средние по всем данным показатели (406.4 ( $C_{mic}$ ) и 2.21 (MET2)) хорошо согласуются с опубликованными данными. При этом меньшие запасы и большая потенциальная микробная активность наблюдаются на более крутых склонах. Такие показатели говорят о малоблагоприятных условиях питания микроорганизмов и их повышенных затратах на жизнедеятельность, а также о более высокой скорости отмирания микробных клеток (Ивашенко, 2017). Последнее подтверждает и высокая степень усиления базального дыхания пахотного слоя в результате “эффекта Бирча” (по нашим оценкам в 12.3 раза). Это существенно выше аналогичного показателя для заповедных экосистем в том же районе (6.1) и приближается к аналогичному показателю каштаново-солонцовых комплексов сухих степей – 15.2 (Karelin et al., 2017).

Модели, объясняющие пространственное распределение  $C_{орг}$  с помощью данных ДЗЗ, нередки, однако лишь немногие из них относятся к крупному масштабу порядка одного–нескольких км<sup>2</sup>, что подходит для сравнения с нашим случаем. Эти исследования, выполненные на разных типах почв, характеризуются средним или даже низким коэффициентом детерминации:  $r^2 = 0.51$  (Gomez et al., 2008); 0.58 (Suleymanov et al., 2021); 0.66 (Hamzehpour et al., 2019); 0.63–0.69 (Schillaci et al., 2017); 0.23–0.67 [обзор (Angelopoulou et al., 2019)]. О причинах этого уже говорилось во введении. Наши значения коэффициента детерминации при использовании LS-фактора и спектральных характеристик почвы для предсказания  $C_{орг}$  находятся в диапазоне 0.25–0.49, что укладывается в эти пределы, даже несмотря на то, что нами не привлекались гиперспектральные данные и использовались простые однофакторные модели.

Возможно, единственным полностью сопоставимым исследованием является работа Suleymanov et al. (2021), посвященная эродированным старопашотным типичным черноземам Башки-

рии, на участке 14 км<sup>2</sup> с крутизной склонов от 0° до 8°, где оценивали распределение  $C_{орг}$  по 15-ти спектральным индексам, рассчитанным на основе спутниковых данных с разрешением от 10 до 60 м. Наилучшим результатом оказалась средняя по силе связь ( $r^2 = 0.58$ ) одного из индексов с распределением  $C_{орг}$ . Среднее содержание  $C_{орг}$  в этом исследовании совпадает с нашим, однако вариация этого показателя существенно выше ( $CV = 23.7 > 6.8\%$ ), что, вероятнее всего, связано с большей крутизной склонов (4°, в среднем, против 2°, в нашем случае) и большей площадью наблюдений при доказанном ведущем участии водной эрозии. Более низкие уровни базального дыхания были зафиксированы в этой работе на эродированных участках, которые хорошо оценивались визуально по разрывам почвенно-растительного покрова. В нашем случае маркерами водной эрозии были только следы ручейков на поверхности склона (трансекта В), при этом базальное дыхание слабо зависело от угла склона, хотя более надежные микробные показатели это успешно показали.

**Связь используемых показателей с эрозией почвы.** Как уже упоминалось во введении, в наши задачи входило выяснить, возможно ли, используя только данные ДЗЗ из космоса среднего пространственного разрешения, оценить, как меняются основные почвенные характеристики (прежде всего содержание  $C_{орг}$  и микробное дыхание) старопашотных типичных черноземов в зависимости от длины и крутизны склона местности. Последние показатели оценивались, с одной стороны, наземными методами, а с другой – с помощью спутниковых данных. LS-фактор выступал как независимый предиктор почвенных характеристик опосредованно, будучи индикатором потенциала эрозионных процессов в точке наблюдения.

Нельзя отрицать, что эрозия – это сложный процесс, зависящий не только от рельефа, но от многих других факторов, которые учитываются специальными моделями (режим осадков, ветра, способы и режимы обработки почвы, тип почвы, характер растительности и др.). В нашей работе был использован лишь один фактор эрозии (правда, относящийся к ведущим) – рельеф. В данном случае задачей было проверить, можно ли установить значимую количественную связь между относительно простым независимым показателем (мезорельеф), который оценивается с помощью доступной дистанционной информации, и зависимыми от него почвенными характеристиками. Кроме того, изначально было неясно, удастся ли выявить такие связи для старопашотных типичных черноземов при крупном масштабе наблюдений. Поскольку связь эту установить в нашем исследовании удалось почти по всем исследованным почвенным показателям, можно

считать, что для достижения конкретной цели оказалось достаточно простой модели и в этом случае нет необходимости привлекать более сложные. Кроме того, эродированность почвы косвенно оценивалась нами не только через LS-фактор, но и через почвенные характеристики, отражающие степень деградации почвы.

**Оценка применимости полученных результатов.** Нижняя граница пространственного масштаба в нашем исследовании определяется используемым интервалом при отборе наземных проб (60 м) и общей протяженностью трансект (1800 м), а также выраженностью обследованного мезорельефа (угол склона между отдельными пунктами отбора проб на трансектах менялся от 0° до 9°). Из семи известных групп пространственных факторов, определяющих содержание  $C_{орг}$  в данной точке: влияние организмов, климата, рельефа, местоположения, физико-химических свойств почвы, истории ее формирования и материнских пород (Lamichhane et al., 2019), в нашем случае представлены (меняются) только физико-химические свойства почвы и мезорельеф, а воздействие биоты представлено лишь разными растительными культурами на сравниваемых трансектах в год проведения наблюдений.

Границы использованного в работе пространственного масштаба определяют область применения полученных результатов: это старопахотные поля произвольного размера на типичных черноземах, имеющие угол склона в пределах 0°–9°. Поскольку, по-видимому, подавляющее большинство современных пашен находится в указанных пределах (Мамонтов и др., 2016), можно говорить о применимости результатов ко всем старопахотным участкам на типичных черноземах в пределах Европейской территории России. Нижний предел экстраполяции на местности определяется максимальным пространственным разрешением использованных космических снимков (ЦМР: 30 м).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате сопоставления наземных, экспериментальных и дистанционных данных в крупном пространственном масштабе обнаруживаются средние по силе связи между рядом почвенных характеристик и показателями морфологии рельефа, что выражается в снижении содержания ведущих биогенных элементов и соединений (углерод, азот и вода), а также в снижении биомассы микробных сообществ пахотных и подпахотных горизонтов типичных черноземов, длительно находящихся в аграрном использовании, с ростом крутизны склона и LS-фактора (эрозионного потенциала рельефа). Можно говорить о самостоятельной применимости рассчитанного по спутниковым данным LS-фактора для оценки степе-

ни деградации пахотных черноземов через прогноз содержания углерода, азота, воды и связанных с ними биогенных показателей. Применение для этих целей спектральных характеристик, полученных на основе данных ДЗЗ из космоса, менее желательно, так как требует точного соблюдения равенства условий на поверхности почвы, на что оказывают влияние приемы обработки почвы, растительный покров, а также ограничения, накладываемые недостаточным разрешением снимков из космоса.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ

Анализ данных и лабораторные исследования проводились в рамках госзадания № 0148-2019-0006 Института географии РАН. Полевые работы 2020 г. были поддержаны грантом РФФИ № 19-29-05025.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают глубокую благодарность м. н. с. Центра по Проблемам экологии и продуктивности лесов РАН А.С. Куманяеву за участие в проведении лабораторных экспериментов, а также с. н. с., к. г. н. ИГ РАН О.Э. Суховеевой, начальнику КБС ИГ РАН к. г. н. В.Н. Лунину и магистранту Курского госуниверситета А.Н. Золотухину за неоценимую помощь в сборе полевых данных.

## ACKNOWLEDGMENTS

The authors kindly appreciate the junior researcher of the Center for Forest Ecology and Productivity RAS, A.S. Kumanaev for his participation in laboratory experiments, as well as senior researcher Ph.D. O.E. Sukhoveeva, the head of the Kursk Biosphere Station of the Institute of Geography RAS, Ph.D. V.N. Lunin, and undergraduate of the Kursk State University A.N. Zolotukhin for the invaluable assistance in collecting field data.

## FUNDING

The analysis and laboratory experiments were carried out under the state-ordered research theme of the Institute of Geography RAS no. 0148-2019-0006. The fieldwork in 2020 was supported by the grant of RFBR no. 19-29-05025.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Буряк Ж.А. Совершенствование подходов к оценке эрозионной опасности агроландшафтов с использованием ГИС-технологий // Научн. ведомости БелГУ. Серия: Естественные науки. 2014. Т. 23 (194). С. 140–146.
- Иващенко К.В. Обилие и дыхательная активность микробного сообщества почвы при антропогенном преобразовании наземных экосистем // Дис. ... канд. биол. наук. Пушино, 2017. 205 с.

- Люри Д.И., Горячкин С.В., Караваева Н.А., Денисенко Е.А., Нефедова Т.Г. Динамика сельскохозяйственных земель России в XX веке и постагрогенное восстановление растительности и почв. М.: ГЕОС, 2010. 412 с.
- Мамонтов В.Г., Козут Б.М., Родионова Л.П., Рыжков О.В. Влияние сельскохозяйственного использования чернозема типичного на его структурное состояние и содержание органического углерода в агрегатах разного размера // Изв. ТСХА. 2016. Вып. 6. С. 22–31.
- Плотникова О.О. Роль транспортирующей способности водных потоков в изменении некоторых свойств поверхностных горизонтов эродированных черноземов типичных (на примере Курской области) // Дис. ... канд. биол. наук. М.: МГУ им. М.В. Ломоносова, 2020. 224 с.
- Сушко С.В. Эмиссия двуокси углерода и микробное дыхание почв разных экосистем подтайги и лесостепи (Московская и Курская области) // Дис. ... канд. биол. наук. М.: МГУ им. М.В. Ломоносова, 2019. 137 с.
- Ananyeva N.D., Susyan E.A., Chernova O.V., Wirth S. Microbial respiration activities of soils from different climatic regions of European Russia // *European J. Soil Biol.* 2008. № 44 (2). P. 147–157.  
<https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2007.05.002>
- Anderson J., Domsch K.H. A physiological method for the quantitative measurement of microbial biomass in soils // *Soil Biol. Biochem.* 1978. Vol. 10. P. 215–221.  
[https://doi.org/10.1016/0038-0717\(78\)90099-8](https://doi.org/10.1016/0038-0717(78)90099-8)
- Angelopoulou T., Tziolas N., Balafoutis A., Zalidis G., Bochtis D. Remote Sensing Techniques for Soil Organic Carbon Estimation: A Review // *Remote Sens.* 2019. Vol. 11. P. 676.  
<https://doi.org/10.3390/rs11060676>
- Baumgardner M.F., Kristof S., Johannsen C.J., Zachary A. Effects of organic matter on the multispectral properties of soils // *Indiana Acad. Sci.* 1970. Vol. 79. P. 413–422.
- Chen F., Kissel D.E., West L.T., Adkins W. Field-Scale Mapping of Surface Soil Organic Carbon Using Remotely Sensed Imagery // *Soil Sci. Soc. Am. J.* 2000. Vol. 64. P. 746–753.  
<https://doi.org/10.2136/sssaj2000.642746x>
- Communication from the Commission to the Council, the European Parliament, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. Thematic Strategy for Soil Protection / Commission of the European Communities, Brussels. 2006. COM 2006/231.
- Conant R.T., Ogle S.M., Paul E.A., Paustian K. Measuring and monitoring soil organic carbon stocks in agricultural lands for climate mitigation // *Front. Ecol. Environ.* 2011. Vol. 9. P. 169–173.  
<https://doi.org/10.1890/090153>
- Croft H., Kuhn N.J., Anderson K. On the use of remote sensing techniques for monitoring spatio-temporal soil organic carbon dynamics in agricultural systems // *Catena.* 2012. Vol. 94. P. 64–74.  
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2012.01.001>
- Crowther T., Todd-Brown K., Rowe C., et al. Quantifying global soil carbon losses in response to warming // *Nature.* 2016. Vol. 540. P. 104–108.  
<https://doi.org/10.1038/nature20150>
- Friedlingstein P., O'Sullivan M., Jones M.W. et al. Global Carbon Budget 2020 // *Earth System Sci. Data.* 2020. № 12 (4). P. 3269–3340.  
<https://doi.org/10.5194/essd-12-3269-2020>
- Gomez C., Viscarra Rossel R.A., McBratney A.B. Soil organic carbon prediction by hyperspectral remote sensing and field vis-NIR spectroscopy: an Australian case study // *Geoderma.* 2008. Vol. 146. № 3–4. P. 403–411.  
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2008.06.011>
- Hamzehpour N., Hossein Shafizadeh-Moghadam, Roozbeh Valavi. Exploring the driving forces and digital mapping of soil organic carbon using remote sensing and soil texture // *Catena.* 2019. Vol. 182. № 104141.  
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104141>
- Irons J.R., Weismiller R.A., Petersen G.W. Soil Reflectance // *Theory and Applications of Optical Remote Sens.* / G. Asrar (Ed.). USA, N.Y.: John Wiley and Sons, 1989. P. 66–106.
- IUCN 2015. Land Degradation Neutrality: implications and opportunities for conservation, Technical Brief. 2nd Ed. Nairobi: IUCN, 2015. 19 p.
- IUSS Working Group WRB (2015). World Reference Base for Soil Resources 2014, Update 2015. International Soil Classification System for Naming Soils and Creating Legends for Soil Maps. World Soil Resources Reports № 106. Rome: FAO.
- Karelin D.V., Goryachkin S.V., Kudikov A.V., Lopes de Gerenu V.O., Lunin V.N., Dolgikh A.V., Lyuri D.I. Changes in Carbon Pool and CO<sub>2</sub> Emission in the Course of Postagrogenic Succession on Gray Soils (Luvic Phaeozems) in European Russia // *Eurasian Soil Sci.* 2017. Vol. 50. № 5. P. 559–572.  
<https://doi.org/10.1134/S1064229317050076>
- Ladoni M., Bahrami H.A., Alavipanah S.K. Estimating soil organic carbon from soil reflectance: a review // *Precision Agriculture.* 2010. Vol. 11. P. 82–99.  
<https://doi.org/10.1007/s11119-009-9123-3>
- Lamichhane S., Kumar L., Wilson B. Digital soil mapping algorithms and covariates for soil organic carbon mapping and their implications: A review // *Geoderma.* 2019. Vol. 352. P. 395–413.  
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.05.031>
- Lu D., Li G., Valladares G.S., Batistella M. Mapping soil erosion risk in Rondônia, Brazilian Amazonia: using RUSLE, remote sensing and GIS // *Land Degradation and Develop.* 2004. Vol. 15. P. 499–512.  
<https://doi.org/10.1002/ldr.634>
- Mondal A., Khare D., Kundu S., Mondal S., Mukherjee S., Mukhopadhyay A. Spatial soil organic carbon (SOC) prediction by regression kriging using remote sensing data // *The Egyptian J. Remote Sens. and Space Sci.* 2017. Vol. 20. P. 61–70.  
<https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2016.06.004>
- Moore I.D., Grayson R.B., Ladson A.R. Digital terrain modelling: A review of hydrological, geomorphological, and biological applications // *Hydrol. Processes.* 1991. № 5. P. 3–30.  
<https://doi.org/10.1002/HYP.3360050103>

- Scharlemann J.P.W., Tanner E.V.J., Hiederer R., Kapos V. Global soil carbon: understanding and managing the largest terrestrial carbon pool // *Carbon management*. 2014. Vol. 5. Iss. 1. <https://doi.org/10.4155/cmt.13.77>
- Schillaci C., Acutis M., Lombardo L., Lipani A., Fantappiè M., Märker M., Saia S. Spatio-temporal topsoil organic carbon mapping of a semi-arid Mediterranean region: The role of land use, soil texture, topographic indices and the influence of remote sensing data to modelling // *Sci. of the Total Environ.* 2017. Vol. 601–602. P. 821–832. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.239>
- Schulze D.G., Nagel J.L., Van Scoyoc G.E., Henderson T.L., Baumgardner M.F., Scott D.E. Significance of Organic Matter in Determining Soil Colors // *SSSA Special Publication (Soil Sci. Society of America)*. 1993. P. 71–90. <https://doi.org/10.2136/sssaspecpub31.c5>
- Schwanghart W., Jarmer T. Linking spatial patterns of soil organic carbon to topography – A case study from south-eastern Spain // *Geomorphology*. 2011. Vol. 126. P. 252–263. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.11.008>
- Singh J.S., Gupta V.K. Soil microbial biomass: A key soil driver in management of ecosystem functioning // *Sci. of the Total Environ.* 2018. Vol. 634. P. 497–500.
- Suleymanov A., Gabbasova I., Suleymanov R., Abakumov E., Polyakov V., Liebelt P. Mapping soil organic carbon under erosion processes using remote sensing // *Hungarian Geogr. Bul.* 2021. Vol. 70. № 1. P. 49–64. <https://doi.org/10.15201/hungeobull.70.1.4>
- Vrieling A. Satellite remote sensing for water erosion assessment: A review // *Catena*. 2006. Vol. 65. P. 2–18. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2005.10.005>
- Wang K., Qi Y., Guo W., Zhang J., Chang Q. Retrieval and Mapping of Soil Organic Carbon Using Sentinel-2A Spectral Images from Bare Cropland in Autumn // *Remote Sens.* 2021. Vol. 13. P. 1072. <https://doi.org/10.3390/rs13061072>
- Wei Jb., Xiao Dn., Zhang Xy., Li Xy. Topography and land use effects on the spatial variation of soil organic carbon: A case study in a typical small watershed of the black soil region in northeast China // *Eurasian Soil Sci.* 2008. Vol. 41. P. 39–47. <https://doi.org/10.1134/S1064229308010055>
- Takata Y., Funakawa S., Akshalov K., Ishida N., Kosaki T. Spatial prediction of soil organic matter in northern Kazakhstan based on topographic and vegetation information // *Soil Sci. and Plant Nutrition*. 2007. Vol. 53. P. 289–299. <https://doi.org/10.1111/j.1747-0765.2007.00142.x>

## Soil Microbial Activity and Chemical Properties in Relation to the Topographic Position of Chernozem Arable Lands

D. V. Karelin<sup>1</sup> and P. R. Tsymbarovich<sup>1, \*</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

\*e-mail: petr@tsymbarovich.ru

The need to automate and simplify the spatial and temporal monitoring of economically important soil characteristics, in particular the carbon content of intensively used lands, dictates the continued search for relatively simple ways of their remote evaluation. We discovered medium-strength significant relations of LS-factor (Slope Length and Steepness factor; erosion potential of the relief), and soil characteristics as a result of a statistical analysis of field observations, laboratory experiments, and digital elevation models obtained from space remote sensing data. Surface data were obtained from model transects located in different relief positions of long-term arable chernozems (Kursk Oblast, Russia). These relationships are expressed in decreased content of the key nutrients and compounds (SOC, nitrogen, and water), as well as in reduced presence and altered activity of soil microbiota. We assume that the main reason for this is water erosion and less water availability on steeper slopes. Based on our results, we believe that LS-factor calculated on the basis of satellite remote sensing data is applicable for evaluation of erosion hazard, as well as for prediction of carbon content and other related significant physical, chemical, and biological indicators of the state of perennial arable haplic chernozems for a large spatial scale. At the same time, we found that the spectral characteristics of the soil surface obtained from remote sensing data are less applicable for these purposes. This is due to the dependence of the obtained satellite data on the survey conditions (weather, soil tillage techniques, vegetation cover characteristics) and the limitations imposed by the insufficient resolution of the available satellite images.

**Keywords:** haplic chernozems, LS-factor, soil carbon content, microbial biomass, basal and substrate induced respiration, Earth remote sensing, slope steepness, digital terrain model, Russia

### REFERENCES

- Ananyeva N.D., Susyan E.A., Chernova O.V., Wirth S. Microbial respiration activities of soils from different climatic regions of European Russia. *Eur. J. Soil Biol.*, 2008, vol. 44, no. 2, pp. 147–157. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2007.05.002>
- Anderson J., Domsch K.H. A physiological method for the quantitative measurement of microbial biomass in soils. *Soil Biol. Biochem.*, 1978, vol. 10, pp. 215–221. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(78\)90099-8](https://doi.org/10.1016/0038-0717(78)90099-8)
- Angelopoulou T., Tziolas N., Balafoutis A., Zalidis G., Bochtis D. Remote sensing techniques for soil organic carbon estimation: A review. *Remote Sens.*, 2019,

- vol. 11, 676.  
<https://doi.org/0.3390/rs11060676>
- Baumgardner M.F., Kristof S., Johannsen C.J., Zachary A. Effects of organic matter on the multispectral properties of soils. *Indiana Acad. Sci.*, 1970, vol. 79, pp. 413–422.
- Buryak Zh.A. Improving approaches to assessing the erosion hazard of agricultural landscapes using GIS technologies. *Nauchn. Vedomosti BelGU. Ser.: Estestvennyye Nauki*, 2014, vol. 23 (194), pp. 140–146. (In Russ.).
- Chen F., Kissel D.E., West L.T., Adkins W. Field-scale mapping of surface soil organic carbon using remotely sensed imagery. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2000, vol. 64, pp. 746–753.  
<https://doi.org/10.2136/sssaj2000.642746x>
- COM 2006/231. Communication from the Commission to the Council, the European Parliament, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. Thematic Strategy for Soil Protection. Brussels: Commission of the European Communities, 2006.
- Conant R.T., Ogle S.M., Paul E.A., Paustian K. Measuring and monitoring soil organic carbon stocks in agricultural lands for climate mitigation. *Front. Ecol. Environ.*, 2011, vol. 9, pp. 169–173.  
<https://doi.org/10.1890/090153>
- Croft H., Kuhn N.J., Anderson K. On the use of remote sensing techniques for monitoring spatio-temporal soil organic carbon dynamics in agricultural systems. *Catena*, 2012, vol. 94, pp. 64–74.  
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2012.01.001>
- Crowther T., Todd-Brown K., Rowe C. et al. Quantifying global soil carbon losses in response to warming. *Nature*, 2016, vol. 540, pp. 104–108.  
<https://doi.org/10.1038/nature20150>
- Friedlingstein P., O'Sullivan M., Jones M.W. et al. Global carbon budget 2020. *Earth Syst. Sci. Data*, 2020, vol. 12, no. 4, pp. 3269–3340.  
<https://doi.org/10.5194/essd-12-3269-2020>
- Gomez C., Viscarra Rossel R.A., McBratney A.B. Soil organic carbon prediction by hyperspectral remote sensing and field vis-NIR spectroscopy: An Australian case study. *Geoderma*, 2008, vol. 146, nos. 3–4, pp. 403–411.  
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2008.06.011>
- Hamzhepour N., Shafizadeh-Moghadam H., Valavi R. Exploring the driving forces and digital mapping of soil organic carbon using remote sensing and soil texture. *Catena*, 2019, vol. 182, 104141.  
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104141>
- Irons J.R., Weismiller R.A., Petersen G.W. Soil reflectance. In *Theory and Applications of Optical Remote Sensing*. Asrar G., Ed. N.Y.: J. Wiley & Sons, Inc., 1989, pp. 66–106.
- IUSS Working Group WRB. *World Reference Base for Soil Resources 2014. Update 2015. International Soil Classification System for Naming Soils and Creating Legends for Soil Maps*. World Soil Resources Reports, no. 106. Rome: FAO, 2015. 192 p.
- Ivashchenko K.V. Abundance and respiratory activity of the soil microbial community during anthropogenic transformation of terrestrial ecosystems. *Cand. Sci. (Biol.) Dissertation*. Pushchino, 2017. 205 p.
- Karelin D.V., Goryachkin S.V., Kudikov A.V., Lopes de Gerenu V.O., Lunin V.N., Dolgikh A.V., Lyuri D.I. Changes in carbon pool and CO<sub>2</sub> emission in the course of postagrogenic succession on gray soils (Luvic Phaeozems) in European Russia. *Eurasian Soil Sci.*, 2017, vol. 50, no. 5, pp. 559–572.  
<https://doi.org/10.1134/S1064229317050076>
- Ladoni M., Bahrami H.A., Alavipanah S.K., Norouzi A.A. Estimating soil organic carbon from soil reflectance: A review. *Precis. Agric.*, 2010, vol. 11, pp. 82–99.  
<https://doi.org/10.1007/s11119-009-9123-3>
- Lamichhane S., Kumar L., Wilson B. Digital soil mapping algorithms and covariates for soil organic carbon mapping and their implications: A review. *Geoderma*, 2019, vol. 352, pp. 395–413.  
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.05.031>
- Land Degradation Neutrality: Implications and Opportunities for Conservation. Technical Brief*. Nairobi: IUCN, 2015, 2nd ed. 19 p.
- Lu D., Li G., Valladares G.S., Batistella M. Mapping soil erosion risk in Rondônia, Brazilian Amazonia: using RUSLE, remote sensing and GIS. *Land Degrad. Dev.*, 2004, vol. 15, pp. 499–512.  
<https://doi.org/10.1002/ldr.634>
- Lyuri D.I., Goryachkin S.V., Karavaeva N.A., Denisenko E.A., Nefedova T.G. *Dinamika sel'skokhozyaistvennykh zemel' Rossii v XX veke i postagrogennoe vosstanovlenie rastitel'nosti i pochv* [Dynamics of Agricultural Lands in Russia in the Twentieth Century and Postagrogenic Restoration of Vegetation and Soils]. Moscow: GEOS Publ., 2010. 412 p.
- Mamontov V.G., Kogut B.M., Rodionova L.P., Rzhkov O.V. Influence of agricultural using on the structural condition of typical Chernozem and content of organic carbon in aggregates of different sizes and quality. *Izv. Timiryazev. S-Kh. Akad.*, 2016, vol. 6, pp. 22–31. (In Russ.).
- Mondal A., Khare D., Kundu S., Mondal S., Mukherjee S., Mukhopadhyay A. Spatial soil organic carbon (SOC) prediction by regression kriging using remote sensing data. *Egypt. J. Remote Sens. Space Sci.* 2017, vol. 20, pp. 61–70.  
<https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2016.06.004>
- Moore I.D., Grayson R.B., Ladson A.R. Digital terrain modeling: A review of hydrological, geomorphological, and biological applications. *Hydrol. Process.*, 1991, vol. 5, pp. 3–30.  
<https://doi.org/10.1002/HYP.3360050103>
- Plotnikova O.O. The role of shallow-water flow transport capacity in transformation of some properties of surface horizons of the eroded typical Chernozem (Kursk region). *Cand. Sci. (Biol.) Dissertation*. Moscow: Moscow State Univ., 2020. 224 p.
- Scharlemann J.P.W., Tanner E.V.J., Hiederer R., Kapos V. Global soil carbon: understanding and managing the largest terrestrial carbon pool. *Carbon Manag.*, 2014, vol. 5, no. 1, pp. 81–91.  
<https://doi.org/10.4155/cmt.13.77>
- Schillaci C., Acutis M., Lombardo L., Lipani A., Fantappiè M., Märker M., Saia S. Spatio-temporal topsoil organic carbon mapping of a semi-arid Mediterranean region: The role of land use, soil texture, topographic indices and the influence of remote sensing data to

- modelling. *Sci. Total Environ.*, 2017, vols. 601–602, pp. 821–832.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.239>
- Schulze D.G., Nagel J.L., Van Scoyoc G.E., Henderson T.L., Baumgardner M.F., Scott D.E. Significance of organic matter in determining soil colors. In *Soil Color*. Bigham J.M., Ciolkosz E.J., Eds. The Soil Science Society of America, 1993, pp. 71–90.  
<https://doi.org/10.2136/sssaspecpub31.c5>
- Schwanghart W., Jarmer T. Linking spatial patterns of soil organic carbon to topography – A case study from south-eastern Spain. *Geomorphology*, 2011, vol. 126, nos. 1–2, pp. 252–263.  
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.11.008>
- Singh J.S., Gupta V.K. Soil microbial biomass: A key soil driver in management of ecosystem functioning. *Sci. Total Environ.*, 2018, vol. 634, pp. 497–500.
- Suleymanov A., Gabbasova I., Suleymanov R., Abakumov E., Polyakov V., Liebelt P. Mapping soil organic carbon under erosion processes using remote sensing. *Hungarian Geogr. Bull.*, 2021, vol. 70, no. 1, pp. 49–64.  
<https://doi.org/10.15201/hungeobull.70.1.4>
- Sushko S.V. Carbon dioxide emission and microbial respiration of soils of different ecosystems of the subtaiga and forest-steppe (Moscow and Kursk regions). *Cand. Sci. (Biol.) Dissertation*. Moscow: Moscow State Univ., 2019. 137 p.
- Takata Y., Funakawa S., Akshalov K., Ishida N., Kosaki T. Spatial prediction of soil organic matter in northern Kazakhstan based on topographic and vegetation information. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 2007, vol. 53, pp. 289–299.  
<https://doi.org/10.1111/j.1747-0765.2007.00142.x>
- Vrieling A. Satellite remote sensing for water erosion assessment: A review. *Catena*, 2006, vol. 65, pp. 2–18.  
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2005.10.005>
- Wang K., Qi Y., Guo W., Zhang J., Chang Q. Retrieval and mapping of soil organic carbon using Sentinel-2A spectral images from bare cropland in autumn. *Remote Sens.*, 2021, vol. 13, 1072.  
<https://doi.org/10.3390/rs13061072>
- Wei Jb., Xiao Dn., Zhang Xy., Li Xy. Topography and land use effects on the spatial variation of soil organic carbon: A case study in a typical small watershed of the black soil region in northeast China. *Eurasian Soil Sci.*, 2008, vol. 41, pp. 39–47.  
<https://doi.org/10.1134/S1064229308010055>