

# СОДЕРЖАНИЕ

---

---

Номер 12, 2020

---

---

## ГЕНЕЗИС И ГЕОГРАФИЯ ПОЧВ

- Количественные оценки палеоэкологических изменений в позднем голоцене на юге Восточно-Европейской равнины на основе магнитных свойств почв  
*А. О. Алексеев, Г. В. Митенко, П. А. Шарый* 1425
- Изменчивость свойств черноземов и условий палеосреды в Предкавказье в середине IV тыс. до н. э. (на основе изучения большого кургана Ессентукский 1)  
*А. Э. Сверчкова, О. С. Хохлова, А. А. Калмыков* 1436
- Современный гидроморфизм солонцов лесостепной зоны Западной Сибири  
*Н. В. Елизаров, В. В. Попов, Н. В. Семендяева* 1451
- Анализ информативности методов обработки больших спутниковых данных систем точного земледелия при коррекции крупномасштабных почвенных карт  
*А. Л. Куляница, Д. И. Рухович, П. В. Королева, Е. В. Вильчевская, Н. В. Калинина* 1460
- 

## ХИМИЯ ПОЧВ

- Содержание и состав органического вещества почв Приполярного Урала  
*В. В. Старцев, А. С. Мазур, А. А. Дымов* 1478
- Изотопный состав углерода почвенных липидов в районе разработки нефтегазовых месторождений (Волгоградская область)  
*А. Д. Белик, Ю. К. Васильчук, А. Н. Геннадиев, Н. А. Буданцева, А. П. Жидкин, Р. Г. Ковач, Т. С. Кошовский* 1489
- 

## ФИЗИКА ПОЧВ

- Структурирование почв в присутствии интерполимерного комплекса хитозан–полиакриловая кислота  
*Л. К. Оразжанова, Ж. С. Касымова, Б. Х. Мусабаева, А. Н. Кливенко* 1498
- 

## БИОЛОГИЯ ПОЧВ

- Оценка влияния технологии no-till и вспашки на микробиом южных агрочерноземов  
*Д. А. Никитин, Е. А. Иванова, А. Д. Железова, М. В. Семенов, Р. Г. Гаджиумаров, А. К. Тхакахова, Т. И. Чернов, Н. А. Ксенофонтова, О. В. Кутовая* 1508
- 

## АГРОХИМИЯ И ПЛОДОРОДИЕ ПОЧВ

- Влияние систем удобрения на содержание почвенного органического углерода и урожайность сельскохозяйственных культур: результаты длительных полевых опытов Географической сети России  
*В. Г. Сычев, А. Н. Налиухин, Л. К. Шевцова, О. В. Рухович, М. В. Беличенко* 1521
- 

## ДЕГРАДАЦИЯ, ВОССТАНОВЛЕНИЕ И ОХРАНА ПОЧВ

- Анализ ввозимых почвогрунтов для прогнозирования запасов углерода в почвенных конструкциях Московского мегаполиса  
*И. П. Брянская, В. И. Васенев, Р. А. Брыкова, В. Н. Маркелова, Н. В. Ушакова, Д. Д. Госсе, Е. В. Гавриленко, Е. В. Благодатская* 1537
- 
-

# Contents

---

---

No. 12, 2020

---

---

## Genesis and Geography of Soils

- Quantitative Estimates of Paleoenvironmental Changes in the Late Holocene in the South of the East European Plain as Recorded in the Magnetic Properties of Soils  
*A. O. Alekseev, G. V. Mitenko, and P. A. Shary* 1425
- Variations in the Properties of Chernozems and Paleoenvironmental Conditions in the North Caucasus in the 4th Millennium BC according to the Results of the Study of Essentuksy 1 Kurgan  
*A. E. Sverchkova, O. S. Khokhlova, and A. A. Kalmykov* 1436
- Modern Hydromorphism of Solonchets in the Forest-Steppe Zone of Western Siberia  
*N. V. Elizarov, V. V. Popov, and N. V. Semendyaeva* 1451
- Analysis of the Information Content of Big Remote Sensing Data Used in Precision Farming Systems for the Correction of Large-Scale Soil Maps  
*A. L. Kulyanitsa, D. I. Rukhovich, P. V. Koroleva, E. V. Vilchevskaya, and N. V. Kalinina* 1460
- 

## Soil Chemistry

- The Content and Composition of Organic Matter of Soils of the Subpolar Urals  
*V. V. Startsev, A. S. Mazur, and A. A. Dymov* 1478
- Isotopic Composition of Carbon in Soil Lipids in the Area of Oil and Gas Extraction, Volgograd Oblast  
*A. D. Belik, Yu. K. Vasil'chuk, A. N. Gennadiev, N. A. Budantseva, A. P. Zhidkin, R. G. Kovach, and T. S. Koshovskii* 1489
- 

## Soil Physics

- Soil Structuring in the Presence of the Chitosan–Polyacrylic Acid Interpolymer Complex  
*L. K. Orazzhanova, Zh. S. Kassymova, B. Kh. Mussabayeva, and A. N. Klivenko* 1498
- 

## Soil Biology

- Assessment of Impact of No-Till Technology and Ploughing on Microbiome of Southern Agrochernozems  
*D. A. Nikitin, E. A. Ivanova, A. D. Zhelezova, M. V. Semenov, R. G. Gadzhumarov, A. K. Tkhakakhova, T. I. Chernov, N. A. Xenofontova, and O. V. Kutovaya* 1508
- 

## Agricultural Chemistry and Fertility of Soils

- Influence of Fertilizer Systems on the Soil Organic Carbon Content and Crop Yields: Results of Long-Term Field Experiments at the Geographical Network of Research Stations in Russia  
*V. G. Sychev, A. N. Naliukhin, L. K. Shevtsova, O. V. Rukhovich, and M. V. Belichenko* 1521
- 

## Degradation, Rehabilitation, and Conservation of Soils

- Analysis of Imported Soils and for Predicting Carbon Stocks in the Soil Structures of Moscow Metropolis  
*I. P. Brianskaia, V. I. Vasenev, R. Brykova, V. N. Markelova, N. V. Ushakova, D. D. Gosse, E. V. Gavrilenko, and E. V. Blagodatskaya* 1537
- 
-

ГЕНЕЗИС  
И ГЕОГРАФИЯ ПОЧВ

УДК 631.48

КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ ОЦЕНКИ ПАЛЕОЭКОЛОГИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ  
В ПОЗДНЕМ ГОЛОЦЕНЕ НА ЮГЕ ВОСТОЧНО-ЕВРОПЕЙСКОЙ  
РАВНИНЫ НА ОСНОВЕ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ ПОЧВ

© 2020 г. А. О. Алексеев<sup>а</sup>, \*, Г. В. Митенко<sup>а</sup>, П. А. Шарый<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН,  
ул. Институтская, 2, Московская область, Пушкино, 142290 Россия

\*e-mail: alekseev@issp.psn.ru

Поступила в редакцию 21.04.2020 г.

После доработки 04.06.2020 г.

Принята к публикации 30.06.2020 г.

Информация об эволюционных изменениях почвенного покрова в прошлом важна как ретроспективная основа для долгосрочных прогнозов развития почв в условиях меняющегося климата, а также с точки зрения понимания современных проблем опустынивания и деградации земель на юге Восточно-Европейской равнины. Основная задача настоящего исследования состояла в количественной оценке сдвига границы сухостепной и пустынно-степной зоны в данном регионе, обусловленного глобальными климатическими вариациями на протяжении позднего голоцена. Для проведения количественных реконструкций палеоосадков, палеотемпературы и аридности климата использованы свойства около ста палеопочв археологических памятников, широко представленных в регионе. Для получения региональных калибровок детально проанализированы зависимости магнитных свойств современных почв юга Восточно-Европейской равнины от климатических данных. Использованы образцы 35 профилей почв в пределах трансекты, отобранной по маршруту Пушкино–Воронеж–Волгоград–Астрахань–Элиста, протяженностью более 1500 км, включающей различные природно-климатические зоны. Градиенты средних годовых осадков ~500 мм/год и температур ~3°C позволили получить достоверную калибровку климатических параметров с современными почвенными свойствами. Выявлены ограничения для проведения климатических реконструкций по магнитным свойствам почв в интервалах среднегодовых осадков <600 мм/год. Картографическая реконструкция изменения индекса аридности (IDM) с использованием методов ГИС моделирования на основе палеопочвенных данных демонстрирует, что за последние 5000 лет на территории Волго-Донского междуречья происходили неоднократные изменения климатической ситуации, вызывавшие миграции границ почвенно-географических зон с амплитудой до 200–300 км.

*Ключевые слова:* глобальные изменения климата, палеопочвы, магнитная восприимчивость почв, индекс аридности, палеорекострукции

DOI: 10.31857/S0032180X20120023

ВВЕДЕНИЕ

В течение четвертичного времени на Восточно-Европейской равнине неоднократно происходили климатические изменения, при этом климат в некоторые периоды существенно отличался от доиндустриального голоцена [8]. Хотя прошлые интервалы потепления были вызваны иными причинами, чем прогнозируемые антропогенные изменения, такие этапы могут дать представление о возможных климатических воздействиях и реакциях степных экосистем и почвенного покрова. Следует учесть, что при изучении палеопочв четвертичного периода рассматриваются временные масштабы от тысячелетий до сотен тысяч лет, которые часто не охватываются при моделировании динамики климата. В связи с этим ко-

личественные реконструкции прошлых условий окружающей среды представляют фундаментальный интерес для палеопочвоведения и палеогеографии. Почвенный покров является важным индикатором и памятью происшедших климатических изменений. В настоящее время разработаны различные методические подходы и инструментальные средства, позволяющие измерить и расшифровать палеопочвенные записи. Последние годы развитие палеопочвоведения идет по пути перехода из области качественного анализа к количественному подходу, к палеорекострукциям в различные исторические и геологические эпохи [5, 27, 36–38].

На современном этапе палеопочвенных работ востребована информация о значимых трендах

развития почв. Особенно это важно для степной зоны юго-востока Восточно-Европейской равнины, где чередующиеся на протяжении голоцена климатические изменения вызывали эволюционные преобразования почвенного покрова. Настоящая проблема актуальна и с точки зрения понимания современных вопросов опустынивания и деградации земель этого региона [11]. Информация об эволюционных изменениях почвенного покрова в прошлом важна как ретроспективная основа для долгосрочных прогнозов развития почв в условиях меняющегося климата. Для степной зоны юга Восточно-Европейской равнины характерна меридиональная почвенно-географическая зональность: западную часть занимает сухая степь с черноземами и каштановыми почвами, а восточную — полупустыня со светло-каштановыми и бурыми полупустынными почвами. Это определяется приуроченностью к пограничной зоне двух крупных факторов динамики климата: сибирского антициклона и атлантического циклона, взаимодействие и взаимовлияние которых неоднократно приводило к динамическим изменениям климатических условий в регионе [8, 19].

Начиная с 80-х годов XX в., проводятся исследования голоценовых палеопочв археологических памятников, погребенных под курганными насыпями разных временных интервалов, охватывающих средний и поздний голоцен на юго-востоке Восточно-Европейской равнины. Основы этих работ заложены сотрудниками Института физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН (Пушино) И.В. Ивановым, В.А. Демкиным и др. [10, 12, 13, 16]. На сегодняшний день благодаря изучению разновозрастных археологических памятников достигнуты заметные успехи в решении генетико-эволюционных проблем степного почвообразования. Проводятся реконструкции условий природной среды различных этапов голоцена, территориально охватывающие регион степного пояса Восточно-Европейской равнины, включая Центрально-черноземные области [1, 18, 20, 28, 29], Северный Кавказ [2], Поволжье [14, 21].

Исследование магнитных свойств и магнитной минералогии почв широко используется в палеопочвенных работах для реконструкции количества атмосферных осадков в разные исторические и геологические эпохи. Формирование повышенной по сравнению с породой магнитной восприимчивости почв объясняется новообразованием магнитных минералов железа, которое рассматривается как специфический результат почвообразовательного процесса [4, 6, 31]. Наблюдаемое магнитное “усиление” связывают с зависящим от климата формированием и накоплением в почвах магнетита и маггемита. На сегодняшний день предложены модели накопления магнитных минералов в почвах при изменении

климатических параметров [4, 33–35]. Однако знание о связях наблюдаемого увеличения содержания магнитных минералов с характеристиками климата до сих пор остается неполным и дискуссионным.

Ранее применение широкого набора современных инструментальных минералогических и магнитных методов совместно с микробиологическими исследованиями позволило приблизиться к пониманию процессов оксидогенеза железа и магнитной минералогии при степном почвообразовании [3, 4, 21, 32]. Цикл преобразования оксидов железа в степной зоне при изменяющихся климатических условиях представляется следующим образом. Периодическое увлажнение—иссушение при близкой к нейтральной реакции среды (рН 7–8) способствует формированию магнетита в присутствии органического вещества и имеющегося источника железа. Формирование почвенного магнетита требует изначального присутствия катионов  $Fe^{2+}$ , которые в сухих и окисленных степных почвах могут появляться в микрозонах. Здесь в периоды временного повышения влажности, благодаря железоредукторам, происходит восстановление железа с последующим медленным окислением. И наоборот, если уровень осадков возрастает до момента, когда происходит смена щелочной среды на нейтральную или слабокислую, магнетит может не формироваться или начинает растворяться. В погребенных почвах археологических памятников с помощью магнитных методов фиксируется состояние оксидов железа в почве, которое является равновесным для условий почвообразования на момент сооружения насыпи данного хроноинтервала. Содержание почвенного биогенного магнетита может быть использовано как “магнитная запись” о предшествующих условиях окружающей среды степей, что позволяет получать количественные характеристики климата [4, 5, 21, 33, 35]. Задача настоящего исследования состояла в количественной оценке сдвига границы сухостепной и пустынно-степной зоны, обусловленного климатическими вариациями на протяжении позднего голоцена на юге Восточно-Европейской равнины. Для проведения количественных реконструкций палеоосадков, палеотемпературы и аридности климата использовали свойства около ста палеопочв археологических памятников, широко представленных в регионе. Для получения региональных калибровок детально проанализировали зависимость магнитных свойств современных почв от климатических данных для региона, охватывающего территории Воронежской, Волгоградской и Астраханской, Ростовской областей, Республики Калмыкия и Ставропольского края.

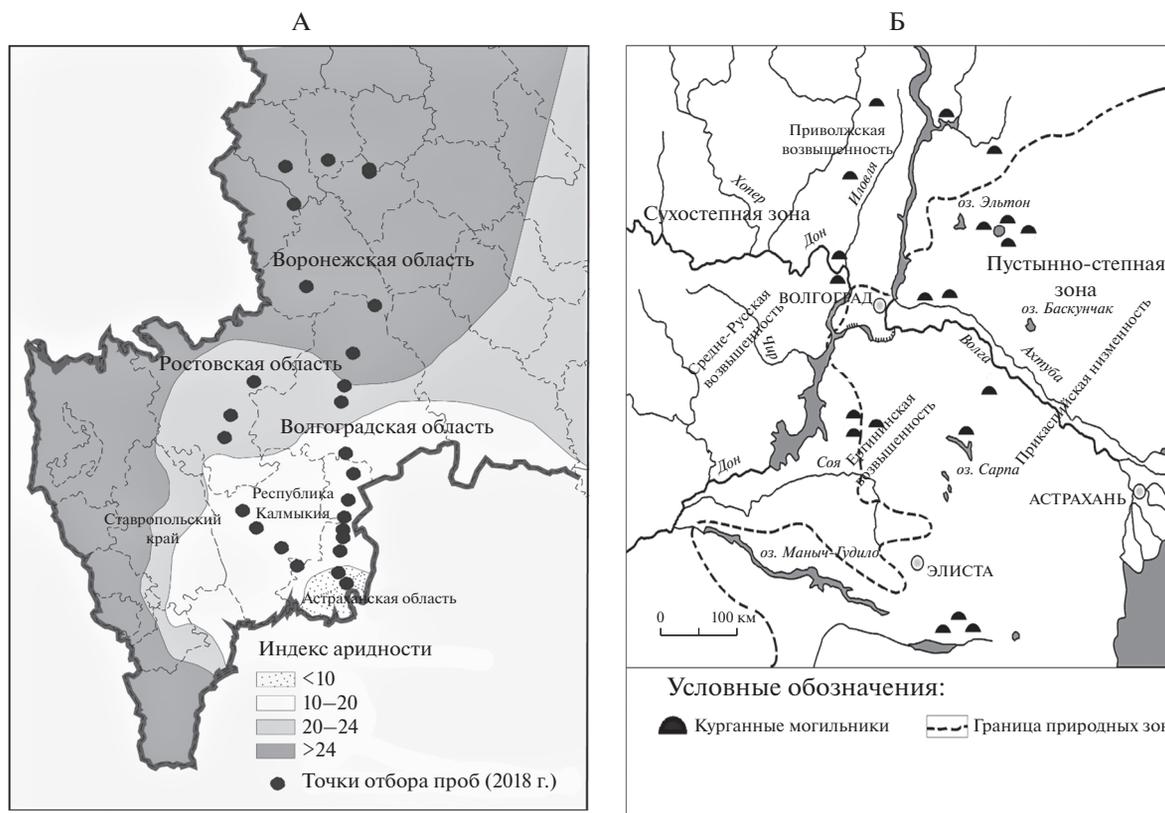


Рис. 1. Карта-схема района исследований почв степной зоны Восточно-Европейской равнины: А – климатическая трансекта 2018 г. Воронеж–Волгоград–Астрахань–Элиста–Воронеж, Б – курганные группы с хронориями палеопочв.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Типичным подходом при изучении палеопочв и использовании петрофизических, минералогических и геохимических показателей почв для количественной реконструкции палеоклиматических условий древних эпох является определение эмпирических зависимостей свойств современных почв с климатическими параметрами. Для получения региональных калибровок зависимости магнитных свойств почв от климатических данных для территории степей Восточно-Европейской равнины использовали образцы из профилей почв, отобранные в ходе проведенных в 2018 г. маршрутных исследований в пределах трансекты отобранной по маршруту Пушкино–Воронеж–Волгоград–Астрахань–Элиста протяженностью более 1500 км, включающей различные природно-климатические зоны (рис. 1, А). Отбор почв по профилю до почвообразующей породы проводили почвенным буром. Отбирали средний образец из трех скважин на расстоянии не более 5 м друг от друга с шагом по глубине 10 см. Среднегодовое количество атмосферных осадков в пределах трансекты изменяется в интервале от 200 до 700 мм/год, среднегодовая температура от +8 до +11°C [19]. Такой градиент осадков и температуры

позволил получить достоверную эмпирическую связь климатических параметров с современными почвенными свойствами.

Изучение магнитных свойств почв включало данные о магнитной восприимчивости ( $\chi$ ) почв и пород. Измерения проводили с использованием Карраmeter КТ-5 (полевые исследования) и Карраbridge KLY-2 (лабораторные исследования).

Климатические параметры анализировали с использованием данных “Климатических справочников СССР”, охватывающих исследуемую территорию [19], базы данных Отдела климатических исследований (факультет естественных наук Университета Восточной Англии) Climatic Research Unit (CRU) [25] <http://www.cru.uea.ac.uk/> и базы данных WorldClim [26], доступной на сайте <http://www.worldclim.org/>. Непосредственно данные метеостанций не могут дать ответа на вопрос о том, сухой климат или влажный: для этого нужно сравнить годовое количество осадков  $P$  с годовой потенциальной эвапотранспирацией  $E_0$  [39], называемой также испаряемостью [7]. Последняя описывает теоретическое суммарное испарение увлажненной поверхности и обычно не измеряется метеостанциями, но может быть рассчитана. Эмпирическая методика расчета  $E_0$  описана в [39],

в ней для расчета используются среднемесячные температуры. Этот подход оценивают, как один из лучших при использовании только температур [30]. Связь  $E_0$  с температурой месяцев нелинейна:  $E_0$  быстро увеличивается с ростом температуры. Реальная эвапотранспирация  $E$  представляет собой испарение (суммарное), которое может быть измерено [7]. Отношение  $KU = P/E_0$  называют коэффициентом увлажнения [7]. Считают, что в тундре и тайге  $KU > 1$ , в лесостепи 0.6–1, в степи 0.3–0.6, в полупустыне 0.12–0.3, в пустыне  $KU < 0.12$  [17]. Помимо  $KU$ , используют также индекс аридности Де Мартона [22, 23]  $IDM = P/(T + 10)$ , где  $T$  – среднегодовая температура. В почвоведении отмечено, что среднегодовая температура  $T$  является усредненным результатом смены сезонов, но при разных температурах сезонов  $T$  может быть одинаковой [15]. Для юга европейской части России в качестве одного из климатических параметров использовали сумму активных температур больше  $10^\circ\text{C}$ .

При палеоклиматических реконструкциях опирались на данные магнитных свойств палеопочв (около 100 профилей) для более чем 20 курганных групп на территории Нижнего Поволжья и Прикаспийской низменности (рис. 1, Б). Обобщали результаты реконструкций условий почвообразования степной зоны, базирующиеся на исследовании магнитных свойств почв хронорядов, включающих современные фоновые и погребенные под курганными насыпями почвы эпох бронзы (конец IV–II тыс. до н. э.), раннего железа (V в. до н. э.–IV в. н. э.) и средневековья (XII–XIV вв. н. э.). Наиболее представительные педохроноряды охватывают почвы, погребенные ~5100, ~4900, ~4000, ~3600–1900, ~1750, ~700 л. н., и современную почву [4, 21].

Моделирование пространственного распределение индекса аридности IDM (по Де Мортону) для анализа сдвига границ сухостепной и пустынно-степной зоны на протяжении позднего голоцена на юге Восточно-Европейской равнины в разные периоды позднего голоцена, базирующееся на палеопочвенных палеоклиматических реконструкциях, проводили с помощью приложения пространственного анализа геоинформационной системы QGIS. Положение границ сухостепной и пустынно-степной зоны ( $IDM = 20$ ) рассчитывали методом обратных взвешенных расстояний (IDW).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Цикл преобразования оксидов железа в степной зоне при изменяющихся климатических условиях позволяет предположить, что для каждого характерного значения атмосферных осадков в пределах 200–600 мм/год достигается равновесное содержание магнитного материала, в первую очередь маг-

нетита. Длительные засушливые периоды с увеличением скорости окисления и уменьшением влажности способствуют формированию наиболее окисленных форм железа: гематита и гетита. При этом высокая скорость окисления, большое содержание органического вещества и низкие значения рН (4–6) способствуют формированию гетита. Высокая температура, уменьшение влажности и щелочные значения рН приводят к формированию гематита. Таким образом, наблюдаемое “магнитное усиление” в гумусовых горизонтах степных почв связывается с зависящей от климата аккумуляцией мелких частиц магнетита  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  и маггемита  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  [4].

Следует заметить, что на сегодняшний день используют разные показатели минералогии оксидов железа в почвах, связанные с климатическими вариациями. Во-первых, это содержание магнетита, определяемое экспрессными измерениями магнитной восприимчивости почв. Этот параметр имеет ограничения использования при реконструкциях в пределах среднегодовых осадков до 1000 мм/год [31–34]. Кроме того, для климатических реконструкций предлагается использовать отношение содержания гетита к гематиту в почвах [24], позволяющее существенно расширить диапазон реконструируемых атмосферных осадков (100–3000 мм/год). Однако в последнем методе для проведения детального изучения магнитной минералогии применяются дорогостоящие криогенные магнетометры. Точное определение соотношения гетит/гематит в почвах другими минералогическими методами затруднено.

Для использования “магнетитового” параметра анализа сдвига границ сухостепной и пустынно-степной зоны на протяжении позднего голоцена детально изучали связи магнитной восприимчивости почв с климатическими характеристиками для юга Восточно-Европейской равнины.

Основным источником данных для расчета характеристик климата была глобальная база данных WorldClim [26]. В ней хранятся данные об осадках, минимальной, средней и максимальной температуре каждого месяца, усредненные за 50 лет (1950–2000 гг., что близко к климатическим нормам, т. е. средним за 1961–1990 гг.), представленные с высоким разрешением 900 м. Они получены интерполяцией данных метеостанций по широте, долготы и высоте. Кроме того, WorldClim содержит 19 “биоклиматических” переменных: среднегодовые данные о температуре и осадках, вариативность температуры, коэффициент вариации количества осадков. Все описанные характеристики климата рассчитывали по данным WorldClim в проекции Ламберта с разрешением 1 км.

С целью получения региональных калибровок связи магнитных свойств почв с климатическими параметрами использовали образцы профилей

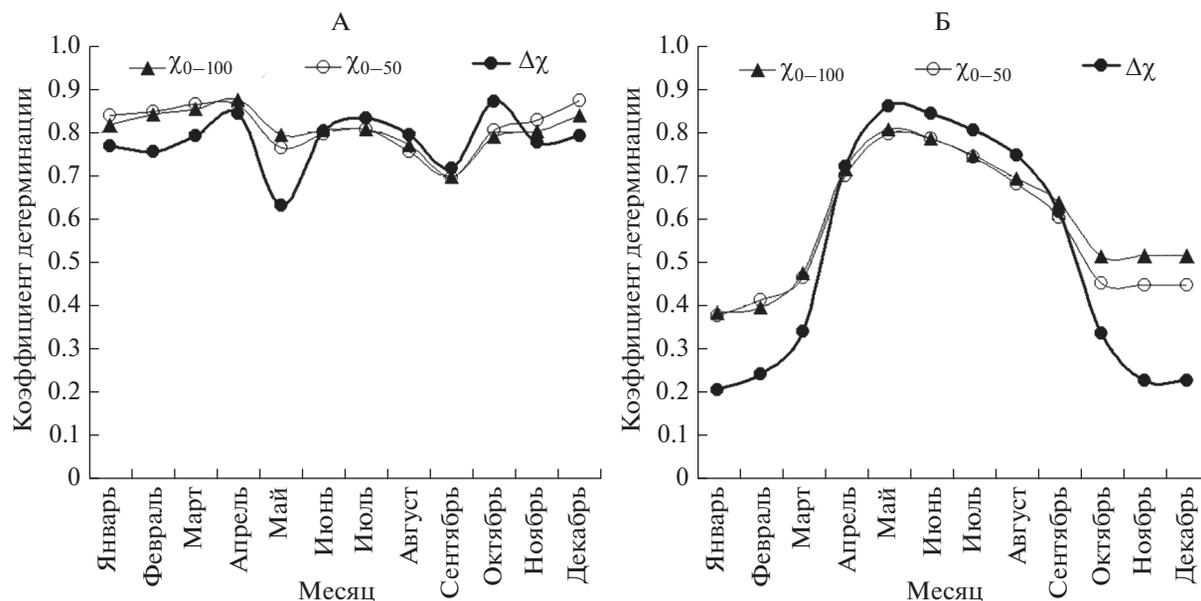


Рис. 2. Связь показателей  $\Delta\chi_{0-100}$ ,  $\Delta\chi_{0-50}$  и  $\Delta\chi$  удельной магнитной восприимчивости почв с данными о среднемесячном количестве осадков (А) и температуре (Б). Все связи с количеством осадков положительны, с температурами — отрицательны.

почв, отобранных в ходе проведенных в 2018 г. маршрутных экспедиционных исследований в пределах трансекты, охватывающей полупустыню, степь и лесостепь (рис. 1, А). Сформирована выборка для 24 точек, в каждой из которых рассчитали три показателя, характеризующие прирост магнитной восприимчивости в почвенном профиле:  $\Delta\chi_{0-100}$  — средний взвешенный прирост относительно материнской породой до глубины 1 м,  $\Delta\chi_{0-50}$  — средний взвешенный прирост до глубины 0.5 м и прирост  $\Delta\chi$  за счет почвообразования, определенный как разность значений  $\chi$  верхнего слоя почв (0–20 см) и почвообразующей породы. Величины  $\Delta\chi_{0-100}$  и  $\Delta\chi_{0-50}$  определяются как средневзвешенная для почвенного профиля разность между  $\chi$  генетических горизонтов или слоев почвы и  $\chi$  породы:

$$\Delta\chi_{0-100} = \Sigma h_i (\chi_i - \chi_{мп}) / \Sigma h_i,$$

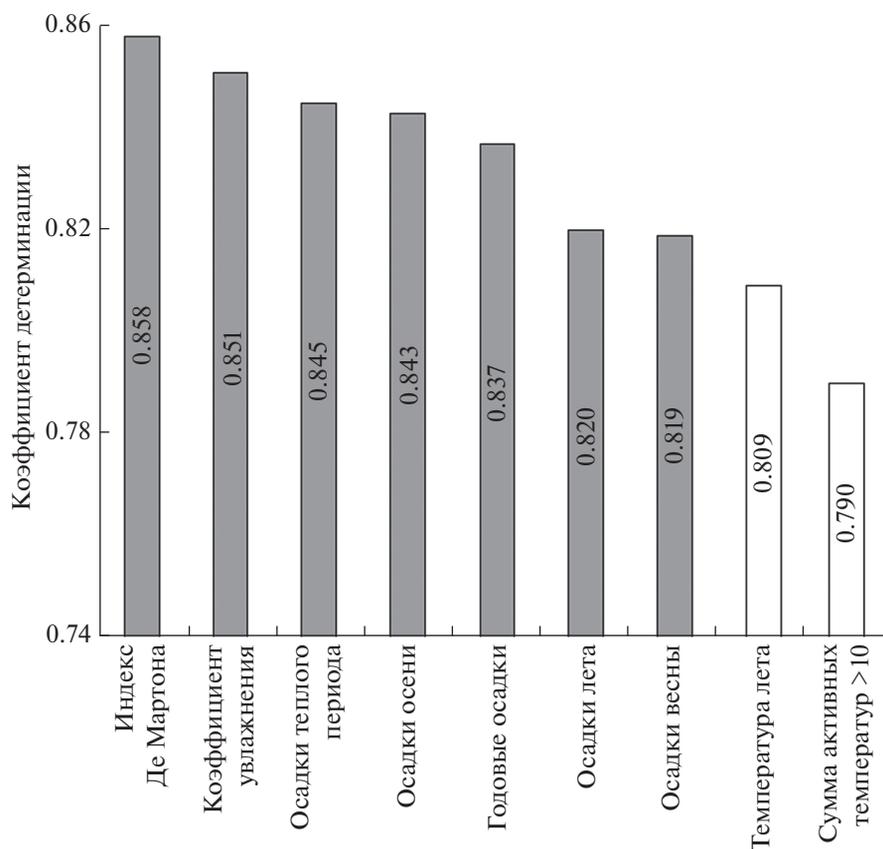
где  $h_i$  — мощность горизонта  $i$ ,  $\chi_{мп}$  — магнитная восприимчивость материнской породы,  $\chi_i$  — магнитная восприимчивость горизонта  $i$ .

Показатель средневзвешенного прироста обычно используется для сравнительного анализа близких по генезису и магнитной восприимчивости ( $\chi$ ) почв, он позволяет более полно отразить особенности  $\chi$  почвенного профиля.

Для оценки связи  $\Delta\chi_{0-100}$ ,  $\Delta\chi_{0-50}$  и  $\Delta\chi$  с осадками и температурой учтем, что эти связи существенно нелинейны (обычно немонотонны) и удовлетворительно описываются многочленом второй степени, коэффициент детерминации с которым (в полино-

миальной регрессии) использовали для оценки тесноты связи. Знак связи оценивали по линейной парной связи. Связи  $\Delta\chi_{0-100}$ ,  $\Delta\chi_{0-50}$  и  $\Delta\chi$  с осадками и температурами месяцев показаны на рис. 2. Полученные результаты свидетельствуют, что в теплый период (апрель—октябрь) связь  $\Delta\chi_{0-100}$ ,  $\Delta\chi_{0-50}$  и  $\Delta\chi$  с температурой усиливается, а связь с осадками слабо зависит от времени года. В целом связи с количеством осадков более тесные, чем с температурой. Все три показателя прироста магнитной восприимчивости демонстрируют близкие распределения, поэтому в дальнейшем остановимся на описании результатов для  $\Delta\chi$ . Кроме того, этот параметр ранее использовали при проведении реконструкций климата по магнитным свойствам палеопочв археологических памятников региона [4, 21].

Считается, что магнитное “усиление”, описываемое приростом магнитной восприимчивости ( $\Delta\chi$ ), связано, главным образом, со среднегодовыми осадками, что используется для оценки палеоклимата по магнитным свойствам палеопочв [4, 21, 31–33]. В то же время отмечается, что магнитное усиление не может быть связано только с осадками  $P$ , поскольку, например, при коэффициенте увлажнения  $P/E_0 \geq 1$  магнитное усиление исчезает. В областях с низкой эвапотранспирацией эффект увеличения магнитной восприимчивости при росте количества осадков “обнуляется”, при этом следует учитывать, что потенциальная эвапотранспирация  $E_0$  существенно зависит от температуры [35].



**Рис. 3.** Связи прироста магнитной восприимчивости ( $\Delta\chi$ ) с характеристиками климата. Серые столбики означают положительную линейную связь, белые — отрицательную. Цифрами указан коэффициент детерминации  $R^2$ .

Коэффициенты детерминации  $R^2$  парных связей прироста  $\Delta\chi$  с климатическими факторами образуют спектр тесноты связей, который мы для наглядности упорядочили по убыванию  $R^2$ . Из-за нелинейности большинства связей оценивали связь  $\Delta\chi$  с каждым климатическим фактором в полиномиальной квадратичной регрессии, как при построении кривых (рис. 2). Поскольку прирост магнитной восприимчивости ( $\Delta\chi$ ) в целом убывает или возрастает с изменением климатических параметров, знак связи оценен с помощью простой линейной регрессии. Мы исключаем из рассмотрения связи  $\Delta\chi$  с осадками и температурами отдельных месяцев, ограничиваясь осадками и температурой времен года, а также теплового (апрель–октябрь) и холодного периодов. Основные результаты для нелинейных связей прироста магнитной восприимчивости ( $\Delta\chi$ ) с характеристиками климата показана на рис. 3.

Наиболее тесная парная связь прироста магнитной восприимчивости ( $\Delta\chi$ ) наблюдается не со среднегодовым количеством осадков, которое находится на шестом месте в списке коэффициентов детерминации (рис. 3), а с индексом аридности Де Мартона (IDM) и коэффициентом

увлажнения KU, концептуально близкими друг другу. Полученные результаты согласуются с физической теорией Оргейра с соавт. [35], согласно которой величина KU, наряду с осадками и потенциальной эвапотранспирацией, играет важную роль в формировании магнитного “усиления” почв. Особенно резко меняются магнитные свойства почв в небольшом диапазоне значения  $KU = 0.5–1.0$ . В нашем случае это отвечает значению  $KU \sim 0.6$  (разделяющему степь и лесостепь), выше которого прирост магнитной восприимчивости ( $\Delta\chi$ ) уменьшается с ростом KU, как и с увеличением количества осадков  $>600$  мм/год (рис. 4). В полупустыне, при  $KU < 0.2$ , происходит ослабление или даже исчезновение прироста магнитной восприимчивости, выражающееся в малости или даже отрицательности прироста  $\Delta\chi$  (рис. 4, А). Этому отвечает малая сумма годовых осадков, меньше 250 мм/год (рис. 4, Б). При количестве среднегодовых осадков  $>600$  мм/год или при коэффициенте увлажнения  $>0.6$  (в лесостепи при KU от 0.6 до 0.9) магнитное усиление также имеет тренд уменьшения, но не исчезает. Как уже отмечалось, оно исчезает при  $KU \geq 1$  ( $MAP > 1000$  мм/год) [33–35].

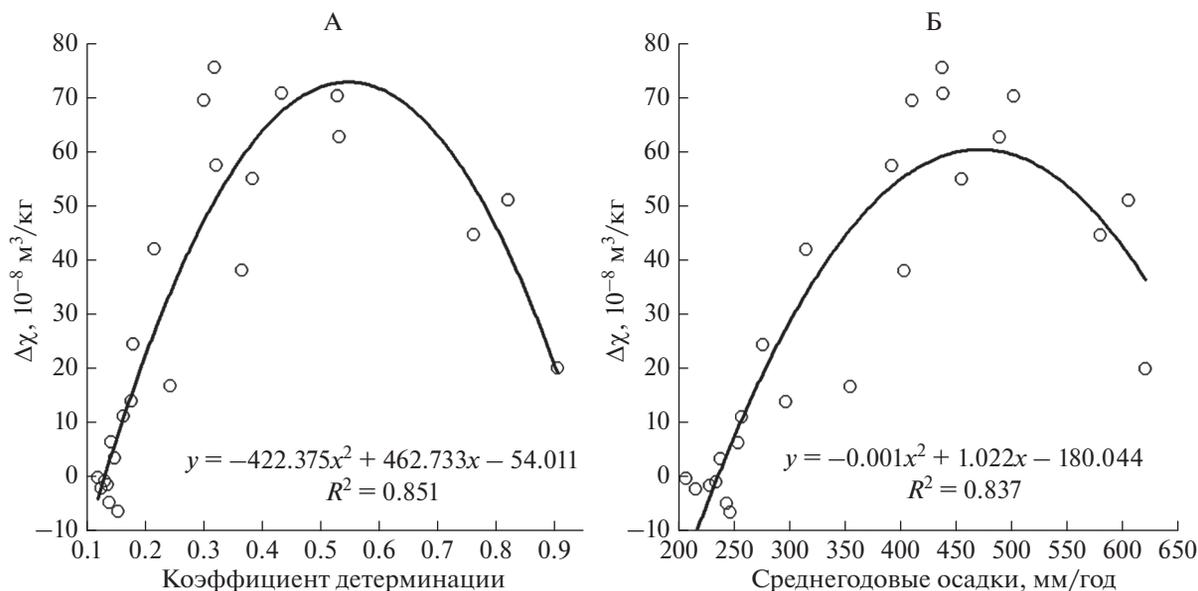


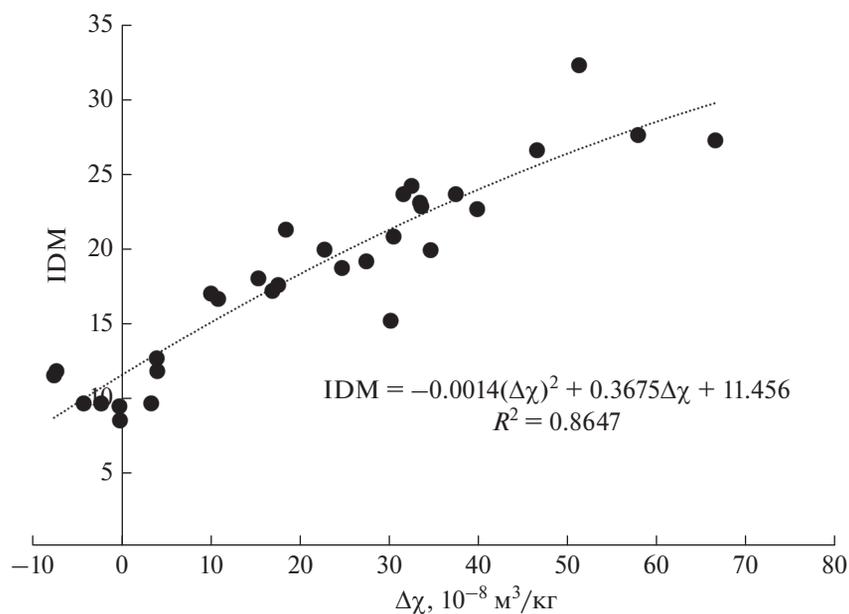
Рис. 4. Зависимость характеризующего магнитное усиление прироста магнитной восприимчивости ( $\Delta\chi$ ) от коэффициента увлажнения (А) и от среднегодового количества осадков (Б).

Отметим, что нелинейная связь  $\Delta\chi$  с индексом аридности Де Мартона (IDM) оказывается более тесной, чем с коэффициентом увлажнения. Следует подчеркнуть, что гидротермический показатель IDM – наиболее подходящий с точки зрения возможных палеоклиматических реконструкций, позволяющих количественно проследить тренд аридизации климата. По индексу аридности засушливые регионы мира подразделяются на три зоны: аридную, семиаридную и сухую субгумидную. В аридной зоне индекс IDM изменяется в пределах 0–10, почвы бурые пустынные, зональная растительность солянково-полынная, годовое количество осадков 100–200 мм. В семиаридной зоне индекс аридности IDM изменяется в пределах 10–20, почвы светло-каштановые, зональная растительность злаково-полынная, среднее годовое количество осадков 200–400 мм. В сухой субгумидной зоне (сухие степи) IDM составляет 20–25, почвы каштановые и южные черноземы, зональная растительность бедно разнотравная ксерофильно-злаковая, количество осадков 400–600 мм [9, 23].

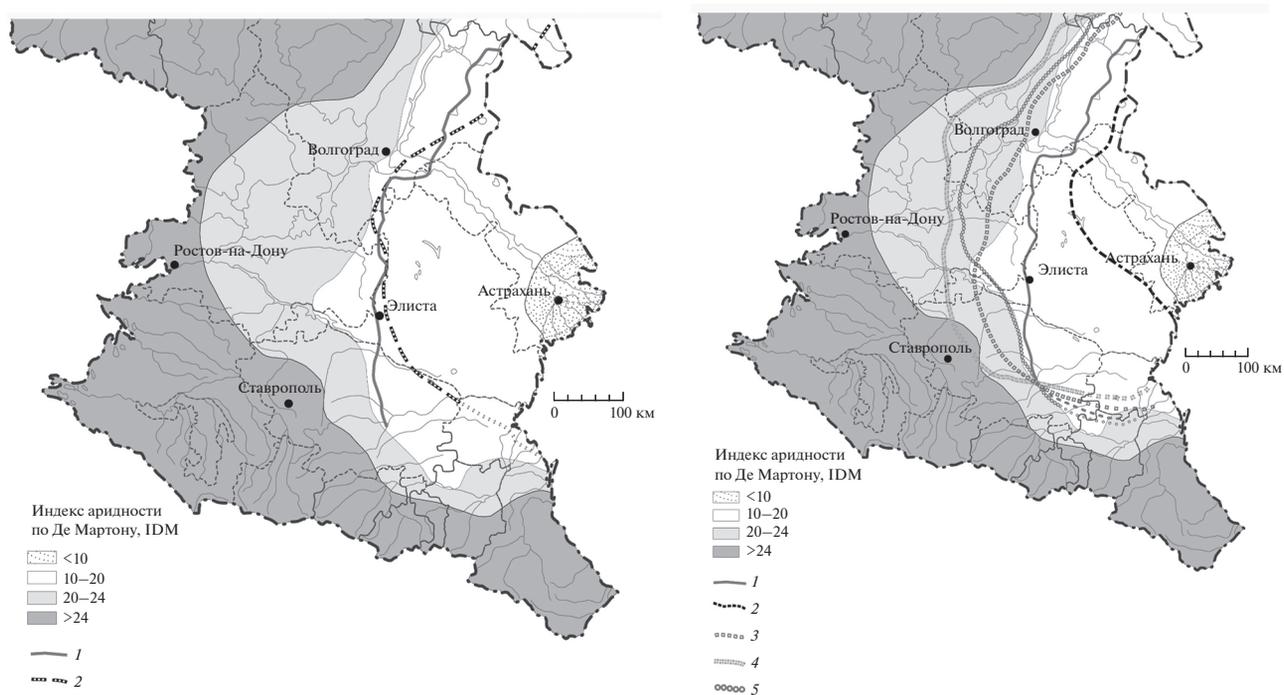
Полученные результаты указывают на то, что не только количество палеоосадков, но и температура могли бы быть оценены по данным о приросте магнитной восприимчивости ( $\Delta\chi$ ). Однако это касается не среднегодовой температуры, а суммы активных температур  $>10^\circ\text{C}$  или температуры теплого периода, так как в холодный период связь  $\Delta\chi$  с температурой становится существенно менее тесной (рис. 2).

Наблюдаемая связь прироста ( $\Delta\chi$ ) с коэффициентом увлажнения KU (IDM), а также со сред-

негодовым количеством осадков MAP не только нелинейная, но и немонотонная. Следовательно, данному значению ( $\Delta\chi$ ), например  $50 \times 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$ , отвечают два значения коэффициента увлажнения KU ( $\sim 0.32$  – степь и  $\sim 0.8$  – лесостепь) и осадков MAP ( $\sim 370$  и  $\sim 580$  мм/год). Для детализации полученных зависимостей планируется дальнейшее исследование магнитных свойств почв лесостепи (KU 0.6–1). Учитывая выявленные на сегодняшний день ограничения, в дальнейших калибровках для палеорекострукции индекса аридизации IDM использовали выборку точек для степной зоны с каштановыми и бурыми пустынными почвами, соответственно, ограничиваясь интервалом среднегодовых атмосферных осадков (MAP)  $<600$  мм/год. Отметим, что в случае больших MAP или KU (в северных участках изучаемой территории) палеорекострукция становится неоднозначной. При исключении этих участков зависимость монотонна, и решение для предсказанных значений однозначно. Кроме того, именно в зоне с каштановыми и бурыми пустынными почвами сосредоточены все исследуемые палеопочвенные объекты, используемые в палеорекострукциях. Для расширения выборки кроме образцов почв, отобранных в 2018 г., для исследования зависимости (“калибровки”) индекса аридизации IDM с магнитными свойствами почв включили данные прироста магнитной восприимчивости для современных степных почв климатической трансекты 1999 г. от Заволжья до Северного Кавказа [3, 4, 22]. Статистическая обработка данных, включающих результаты магнитных свойств 35 почвенных профилей почв степной зоны, для



**Рис. 5.** Связь прироста магнитной восприимчивости в почвенном профиле современных почв степной зоны с индексом аридности Де Мартона (IDM).



**Рис. 6.** Результаты ГИС моделирования сдвига границы сухостепной и пустынно-степной зоны ( $IDM = 20$ ) на юге Восточно-Европейской равнины в разные хроноинтервалы голоцена по палеопочвенным данным: А – сравнение границы индекса аридности по магнитным свойствам почв и метеоданным (1 – настоящее время, по климатическим справочникам, 1966; 2 – настоящее время, по данным магнитной восприимчивости). Б – реконструкции положения границы  $IDM = 20$  в разные интервалы позднего голоцена: 1 – настоящее время, по климатическим справочникам, 1966; 2 – 600–700 л. н.; 3 – 600–1800 л. н.; 4 – 3700–4000 л. н.; 5 – 5100–4000 л. н.

получения эмпирических климатических зависимостей продемонстрировала надежную связь прироста магнитной восприимчивости ( $\Delta\chi$ ) в почвенном профиле с индексом аридности IDM (коэффициент корреляции  $R^2 = 0.86$ ) (рис. 5). На основании установленной зависимости по данным магнитных измерений палеопочв возможно определение индекса аридности (IDM) в прошлые исторические и геологические эпохи. Полученный инструмент применяли ко всем накопленным на сегодняшний день данным о магнитных свойствах для более 100 погребенных почв археологических памятников региона (рис. 1, Б) и проводили реконструкцию гидротермического показателя индекса аридности (IDM) для количественной оценки сдвигов границ климатических зон на протяжении позднего голоцена на юге Восточно-Европейской равнины (рис. 6). Картографическая реконструкция изменения индекса аридности (IDM) и положения границ сухостепной и пустынно-степной зоны ( $IDM = 20$ ) с использованием методов ГИС моделирования на основе палеопочвенных данных демонстрирует, что за последние 5000 лет на территории Волго-Донского междуречья происходили неоднократные изменения климатической ситуации, вызывавшие миграции границ почвенно-географических зон. Полученные результаты демонстрируют существенные сдвиги, выявлена динамика с амплитудой до 200–300 км. Резкое увеличение атмосферной увлажненности отмечается в “средневековый климатический оптимум” (хроноинтервал 600–700 л. н.), что привело к существенному сдвигу границы сухостепных ландшафтов в ареалы пустынно-степных. Раннежелезный век (хроноинтервал 1600–1800 л. н.) характеризовался климатическими условиями, близкими к современным. Максимум аридизации, охватывающий регион, приходился на рубеж III–II тыс. до н. э. (хроноинтервал 3700–4000 л. н.). Наблюдался засушливый климат со смещением природных рубежей к северу относительно современных условий, происходило развитие пустынно-степных ландшафтов на месте сухостепных. В конце III тыс. до н. э. (хроноинтервал 5100–4000 л. н.) аридизация ослабла.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью климатических зависимостей изменений магнитной восприимчивости в профиле современных почв степей юга Восточно-Европейской равнины в пределах трансекты, отобранной по маршруту Пушино–Воронеж–Волгоград–Астрахань–Элиста, продемонстрирована возможность определения количественных показателей состояния климатических условий: количества атмосферных осадков, индекса аридности (IDM), коэффициента увлажненности (KU) в прошлые

эпохи. В погребенных почвах археологических памятников с помощью магнитных методов определяли состояние магнитного материала в почве на момент погребения, которое является равновесным с условиями почвообразования для данного хроноинтервала. Содержание почвенного магнетита используется как “магнитная запись” о предшествующих условиях окружающей среды степей и позволяет получать количественные реконструкции климата, а также количественно оценить сдвиг природных границы на протяжении позднего голоцена на юге Восточно-Европейской равнины обусловленного климатическими вариациями. Следует учесть выявленные ограничения для проведения климатических реконструкций и возможность использования предлагаемого инструмента только в определенных интервалах среднегодовых атмосферных осадков (MAP), не превышающих 600 мм/год.

Картографическая реконструкция изменения индекса аридности (IDM) с использованием методов ГИС моделирования на основе палеопочвенных данных для более чем 100 погребенных почв археологических памятников региона демонстрирует, что за последние 5000 лет на территории Волго-Донского междуречья происходили неоднократные изменения климатической ситуации, вызывавшие миграции границ почвенно-географических зон с амплитудой до 200–300 км. На основании полученных данных возможно детализировать палеоэкологическую периодизацию позднего голоцена для степной и лесостепной зон Восточной Европы. Результаты исследования палеопочв голоцена и палеоклиматические параметры могут быть использованы для создания сценариев будущих изменений семиаридных степных экосистем юга России, связанных с глобальными изменениями климата.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке РФФИ гранты 19-29-05178 и 18-04-00800 (экспедиционные исследования).

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

У авторов нет конфликта интересов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александровский А.Л. Эволюция почв Восточно-Европейской равнины в голоцене. М.: Наука, 1983. 150 с.
2. Александровский А.Л., Александровская Е.И. Эволюция почв и географическая среда. М.: Наука, 2005. 223 с.
3. Алексеев А.О., Алексеева Т.В., Махер Б.А. Магнитные свойства и минералогия соединений железа степных почв // Почвоведение. 2003. № 1. С. 62–74.

4. Алексеев А.О., Алексеева Т.В. Оксидогенез железа в почвах степной зоны. М.: ГЕОС, 2012. 204 с.
5. Алексеев А.О., Калинин П.И., Алексеева Т.В. Почвенные индикаторы параметров палеоэкологических условий на юге восточно-европейской равнины в четвертичное время // Почвоведение. 2019. № 4. С. 389–399. <https://doi.org/10.1134/S0032180X19040026>
6. Бабанин В.Ф., Трухин В.И., Карпачевский Л.О., Иванов А.В., Морозов В.В. Магнетизм почв. Ярославль: Изд-во ЯГТУ, 1995. 219 с.
7. Будыко М.И. Тепловой баланс земной поверхности. Л.: Гидрометеорологическое изд-во, 1956. 256 с.
8. Величко А.А. Изменение климата и ландшафтов за последние 65 миллионов лет. М.: ГЕОС, 1999. 260 с.
9. Виноградов Б.В. Опустынивание – проблема степной зоны России. Степной бюллетень // Степной бюллетень. 1999. № 3–4. С. 55–58.
10. Геннадиев А.Н., Иванов И.В. Эволюция почв и палеопочвоведение: проблемы, концепции, методы изучения // Почвоведение. 1989. № 10. С. 34–43.
11. Глобальный климат и почвенный покров России: опустынивание и деградация земель, институциональные, инфраструктурные, технологические меры адаптации (сельское и лесное хозяйство). Национальный доклад / Под ред. Р.С.-Х. Эдельгериева. М.: Изд-во МБА, 2019. Т. 2. 476 с.
12. Демкин В.А., Рысков Я.Г., Алексеев А.О., Олейник С.А., Губин С.В. Палеопедологическое изучение памятников степной зоны // Известия АН. Сер. географическая. 1989. № 6. С. 40–51.
13. Демкин В.А. Почвоведение и археология. Пушкино, 1997. 213 с.
14. Демкин В.А., Ельцов М.В., Алексеев А.О., Алексеева Т.В., Демкина Т.С., Борисов А.В. Развитие почв Нижнего Поволжья за историческое время // Почвоведение. 2004. № 12. С. 1486–1497.
15. Димо В.Н. Тепловой режим почв СССР. М.: Колос, 1972. 360 с.
16. Иванов И.В. Эволюция почв степной зоны в голоцене. М.: Наука, 1992. 143 с.
17. Исаченко А.Г. Ландшафтоведение и физико-географическое районирование. М.: Высшая школа, 1991. 366 с.
18. Сычева С.А., Чичагова О.А. Ритмичность почвообразования на среднерусской возвышенности в голоцене // Почвоведение. 1999. № 8. С. 970–979.
19. Справочник по климату СССР. Л.: Гидрометеоиздат, 1967. Вып. 13. 356 с.
20. Чендев Ю.Г., Иванов И.В., Песочина Л.С. Тренды естественной эволюции почв черноземов Восточно-европейской равнины // Почвоведение. 2010. № 7. С. 779–787.
21. Alekseeva T., Alekseev A., Maher B.A., Demkin. V Late Holocene climate reconstructions for the Russian steppe based on mineralogical and magnetic properties of buried palaeosols // Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. 2007. V. 249. P. 103–127.
22. De Martonne E. Aréisme et indice d'aridité // Compt. Rend. Acad. Sci. 1926. V. 182. P. 1395–1398.
23. Encyclopedia of Earth Sciences // Encyclopedia of Climatology. V. XI / Eds J.E. Oliver, R.W. Fairbridge. N.Y.: van Nostrand Reinold, 1987. 103 p.
24. Hyland E., Sheldon N.D., Van der Voo R., Badgley C., Abrajevitch A. A new paleoprecipitation proxy based on soil magnetic properties: implications for expanding paleoclimate reconstructions // Geol. Soc. Am. Bull. 2015. V. 127. P. 975–981. <https://doi.org/10.1130/B31207.1>
25. 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.
26. Hijmans R.J., Cameron S.E., Parra J.L., Jones P.J., Jarvis A. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas // Int. J. Climatol. 2005. V. 25. № 15. P. 1965–1978.
27. Gallagher T.M., Sheldon N.D. A new paleothermometer for forest paleosols and its implications for Cenozoic climate // Geology. 2013. V. 41. P. 647–650.
28. Lisetskii F.N., Goleusov P.V., Chepelev O.A. The development of Chernozems in the Dniester-Prut interfluvium in the Holocene // Eurasian Soil Science. 2013. V. 46. № 5. P. 491–504.
29. Lisetskii F.N., Stolba V.F., Pichura V.I. Late-Holocene paleoenvironments of thouthern Crimea: soil, Soil-climate relationship and human impact // The Holocene. 2017. V. 27. № 12. P. 1859–1875.
30. Lutz J.A., van Wagendonk J.W., Franklin J.F. Climatic water deficit, tree species ranges, and climate change in Yosemite National Park // J. Biogeography. 2010. V. 37. P. 936–950.
31. Maher B.A., Alekseev A.O., Alekseeva T.V. Climate dependence of soil magnetism across the Russian steppe: significance for use of soil magnetism as a palaeoclimatic proxy // Quater. Sci. Rev. 2002. V. 21. P. 1571–1576.
32. Maher B.A., Alekseev A., Alekseeva T. Magnetic mineralogy of soils across the Russian steppe: climatic dependence of pedogenic magnetite formation // Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. 2003. V. 201. № 3–4. P. 321–341.
33. Maher B., Possolo A. Statistical models for use of palaeosol magnetic properties as proxies of palaeorainfall // Global and Planetary Change. 2013. V. 12. P. 280–287
34. Maxbauer D.P., Feinberg J.M., Fox D.L. Magnetic mineral assemblages in soils and paleosols as the basis for paleoprecipitation proxies: a review of magnetic methods and challenges // Earth Science Rev. 2016. V. 155. P. 28–48.
35. Orgeira M.J., Egli R., Compagnucci R.H. A quantitative model of magnetic enhancement in loessic soils // The Earth's Magnetic Interior. IAGA Special Sopron Book Series. Springer, 2011. V. 1. P. 361–397.
36. Retallack G.J. Soils of the Past: An introduction to paleopedology. Malden, USA, Blackwell Science. 2001. 404 p.
37. Sheldon N.D., Tabor N.J. Quantitative paleoenvironmental and paleoclimatic reconstruction using paleosols // Earth-Sci. Rev. 2009. V. 95. P. 1–52.
38. Tabor N.J., Myers T.S. Paleosols as indicators of paleoenvironment and paleoclimate // Annu. Rev. Earth Planet. Sci. 2015. V. 43. P. 333–361.
39. Thornthwaite C.W. An approach toward a rational classification of climate // Geograph. Rev. 1948. V. 38. P. 55–94.

## Quantitative Estimates of Paleoenvironmental Changes in the Late Holocene in the South of the East European Plain as Recorded in the Magnetic Properties of Soils

A. O. Alekseev<sup>1, \*</sup>, G. V. Mitenko<sup>1</sup>, and P. A. Shary<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Physicochemical and Biological Problems of Soil Science, Russian Academy of Sciences, Pushchino, Moscow oblast, 142290 Russia*

*\*e-mail: alekseev@issp.psn.ru*

**Abstract**—One of the tasks of the present study was to quantify the shift of the boundary between the steppe and desert-steppe zones during the late Holocene in the south of the East European Plain under the impact of global climate variations. Information about the evolution of soil cover in the past is essential as a retrospective basis for long-term forecasts of soil development in a changing climate, as well as for understanding the current problems of desertification and land degradation in this region. The properties of about 100 paleosols of archaeological sites widely represented in the region were used for quantitative reconstruction of paleoprecipitation, paleotemperature, and aridity of the climate. To obtain regional calibrations, the dependences of the magnetic properties of modern soils on climatic parameters in the south of the East European Plain were analyzed in detail. Samples of 35 soil profiles along the 1500-km-long Voronezh–Volgograd–Astrakhan–Elista–Voronezh transect were used. This transect crosses several natural climatic zones with variations in the annual precipitation of about 500 mm/year and in the annual temperatures of about 3°C, which allowed us to obtain reliable relationships between the climatic parameters and the properties of modern soils. Limitations for paleoclimate reconstructions based on the magnetic properties of soils in the range of mean annual precipitation <600 mm/year were identified. Cartographic reconstruction of changes in the De Martonne aridity index (IDM) using GIS modeling methods and paleosol data indicates that the Volga–Don interfluvium has undergone repeated changes in the climatic situation over the past 5000 years resulting in the shifts of the boundaries between soil-geographical zones to distances of up to 200–300 km.

*Keywords:* climate change, aridity index, paleosols, magnetic susceptibility, paleoreconstruction

ГЕНЕЗИС  
И ГЕОГРАФИЯ ПОЧВ

УДК 631.48

**ИЗМЕНЧИВОСТЬ СВОЙСТВ ЧЕРНОЗЕМОВ И УСЛОВИЙ ПАЛЕОСРЕДЫ  
В ПРЕДКАВКАЗЬЕ В СЕРЕДИНЕ IV ТЫС. ДО Н. Э.  
(НА ОСНОВЕ ИЗУЧЕНИЯ БОЛЬШОГО КУРГАНА ЕССЕНТУКСКИЙ 1)**

© 2020 г. А. Э. Сверчкова<sup>а, \*</sup>, О. С. Хохлова<sup>а</sup>, А. А. Калмыков<sup>б</sup>

<sup>а</sup>Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН,  
ул. Институтская, 2, Московская область, Пущино, 142290 Россия

<sup>б</sup>ООО “Наследие”, ул. Орджоникидзе, 75, Ставрополь, 355008 Россия

\*e-mail: [acha3107@gmail.com](mailto:acha3107@gmail.com)

Поступила в редакцию 21.01.2020 г.

После доработки 20.05.2020 г.

Принята к публикации 27.05.2020 г.

Изучен педохроноряд, погребенный под разными конструкциями в большом кургане Ессентукский 1 в Предкавказье, сооруженном представителями майкопской культуры во второй четверти IV тыс. до н. э. По археологическим данным, курган возводился несколько десятилетий. За это время изменился морфологический облик и физико-химические свойства почв, а именно, происходило уменьшение мощности гумусового профиля и содержания органического углерода, увеличение содержания гипса, углерода карбонатов, перемещение зоны их аккумуляции вверх по профилю, трансформация форм карбонатных новообразований. Наиболее “засушливый” облик имеет почва, погребенная последней в изученном хроноряду: гумусовый горизонт наиболее светлый и содержание органического углерода в нем наименьшее, профиль наиболее сильно обогащен карбонатами, что проявляется как на макро-, так и микроуровнях наблюдения, отмечается наибольшее содержание обменного натрия и магния в составе обменных оснований, уменьшение величины магнитной восприимчивости и максимальные величины содержания гипса во втором метре профиля. За время строительства кургана произошла смена подтипа почв: черноземы обыкновенные мощные легкоглинистые на лёссовидных карбонатных глинах (Calcic Chernozems (Loamic, Pachic)) эволюционировали в черноземы южные (Haplic Calcisol (Loamic)). Палинологический анализ выявил сокращение площади лесов и увеличение доли травянистой растительности, ее остепнение и ксерофитизацию в регионе за изученное время. Климат рассматриваемого интервала (ранний этап развития майкопской культуры в Предкавказье) характеризуется как аридный и более жаркий по сравнению с современностью.

*Ключевые слова:* курганные конструкции, коротковременной педохроноряд, палинологический анализ, палеоклиматические реконструкции

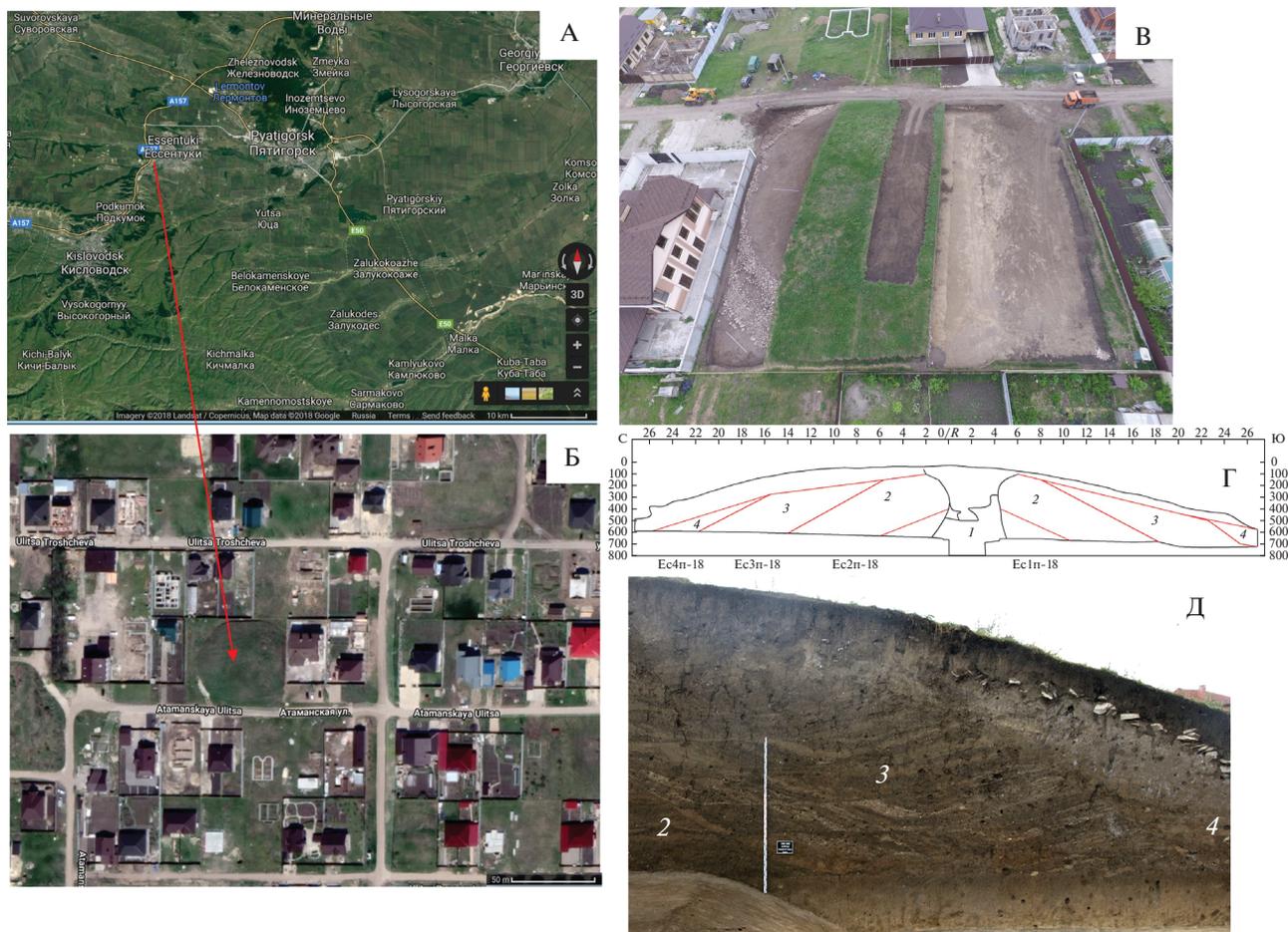
DOI: 10.31857/S0032180X20120126

## ВВЕДЕНИЕ

Палеопочвенные исследования – один из основных путей получения достоверной информации об условиях природной среды прошлого. Ключевым вопросом современного почвоведения является дискуссия о природной голоценовой эволюции почвенного и растительного покрова степной зоны Восточно-Европейской равнины. Со второй половины XX в. отмечается рост популярности исследований палеопочв, погребенных под археологическими памятниками, в частности, курганами, с целью реконструкции палеоклиматических условий былых эпох [1–3, 8, 10, 13, 19], а археологическое почвоведение развивается как самостоятельное научное направление [14, 16].

Вместе с тем ряд вопросов еще остается нерешенным из-за недостатка информации. К ним относится проблема получения достоверных данных об условиях палеосреды отдаленных эпох, когда обычай сооружать курганы еще только зарождался. Это эпоха энеолита и ранней бронзы, финал атлантического и рубеж атлантического и суббореального периодов голоцена, курганов этого времени пока изучено мало. Кроме этого, поскольку крупные курганы раскапываются археологами редко, единичны работы, когда в одном кургане изучаются почвы, погребенные под разновозрастными курганными конструкциями [3, 11, 18, 26].

Проведенное нами исследование посвящено изучению палеопочв под несколькими каменны-



**Рис. 1.** Расположение кургана Эссентукский 1 на карте (А); между домов городской застройки по ул. Атаманской в г. Эссентуки (Б, В); схема центральной бровки западный фас (Г): 1 – первая конструкция, 2 – вторая конструкция, 3 – третья конструкция, 4 – четвертая конструкция и места заложения почвенных разрезов с их номерами; фото северной половины центральной бровки восточный фас (Д), обозначения конструкций на рис. Г и Д совпадают. Карты взяты с сайта <https://www.google.ru/maps/>.

ми и грунтовыми конструкциями в большом кургане, который относится к раннему этапу майкопской культуры раннего бронзового века, 5700–5500 л. н. Палеопочвенные исследования столь ранних майкопских курганов в Предкавказье до сих пор не проводились. Преимущества выявленного подкурганного педохроноряда заключаются в том, что почвы-члены ряда расположены очень близко друг к другу в однородных литолого-геоморфологических условиях, а также в известной хронологии порядка погребения: раньше погребены палеопочвы в центре кургана и позже – на его периферии. Также в данной работе впервые погребенные почвы рассматриваются в связи с этапами строительства большого кургана представителями одной археологической культуры, что позволило четко определить длительность строительства в пределах нескольких десятилетий и установить временной масштаб изменения свойств почв.

Цель работы – выявление направленных изменений свойств почв коротковременного педохроноряда, погребенного под большим курганом, и реконструкция изменений климата за время строительства археологического памятника. Для достижения цели были изучены свойства палеопочв под разновременными конструкциями одного кургана и сопоставлены со свойствами современных почв, а также проведен палинологический анализ.

### ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объект исследования – курган Эссентукский 1, расположенный на северной окраине г. Эссентуки Ставропольского края, между домов частной застройки на ул. Атаманская (44°03'57.0" N 42°54'09.0" E) (рис. 1, А–1, В). Охранно-спасательные раскопки кургана были проведены ООО “Наследие” г. Ставрополь под руководством ар-

хеолога А.А. Калмыкова в 2017–2018 гг., а в июне 2018 г. – палеопочвенное исследование. Курган имел внушительные размеры: высота составляла 5.5–6.0 м, диаметр – более 60 м. Наземная часть кургана состояла из последовательных шести грунтовых и трех каменных конструкций (рис. 1, Г, 1, Д). Согласно радиоуглеродному датированию, проведенному методом ускорительной масс-спектрометрии (AMS) в лаборатории Центра археометрии Курта Энгельхорна в г. Мангейме (Германия), для образцов из первой и третьей грунтовых конструкций были получены интервалы 3653–3522 и 3637–3521 cal BC соответственно. В обоих случаях датировались образцы с малой продолжительностью жизни, не подверженные резервуарному эффекту, что позволяет достаточно достоверно отнести к выявленной разности между временем сооружения указанных конструкций примерно в два десятилетия.

Город-курорт Эссентуки расположен в южной части Ставропольского края, у северных отрогов Главного Кавказского хребта, в 80 км от горы Эльбрус, на равнинном предгорье Скалистого хребта на высоте 600–640 м над ур. м., в зоне формирования минеральных вод. Рельеф местности представляет собой холмистую безлесную равнину, местами изрезанную небольшими балками по долинам рек. Курган располагается на водоразделе рек Кума и Подкумок либо на высокой второй–третьей террасе р. Подкумок, точное геоморфологическое местоположение трудно было установить из-за сплошной городской застройки и изменения исходного рельефа.

Климат континентальный, горно-степной. Средняя температура июля +27.4°C, максимальная температура доходит до +37°C. Среднегодовое количество осадков составляет 530–540 мм, преимущественно осадки выпадают весной и в начале лета. Для территории исследования характерно большое количество солнечных дней (в среднем 280 дней в году).

Зональные почвы – черноземы обыкновенные на лёссовидных карбонатных суглинках и глинах (Calcic Chernozems (Loamic, Pachic)). Естественная растительность предгорья представлена массивами дубово-грабовых лесов, чередующихся с луговыми степями, которая в горах (на высоте 800–1100 м) сменяется широколиственными лесами (бук, дуб, граб). В окрестностях кургана в настоящее время имеются лишь сельскохозяйственные угодья и земли селитебного назначения, а земля рядом с курганом, отданная в частное владение, была заброшена и не обрабатывалась с 1991–1992 г., то есть участок, на котором был заложен разрез фоновой почвы, к моменту нашей работы находился в залежи более 25 лет.

Изучение кургана было начато с морфологического описания курганной конструкции. Курган

был сильно подрезан с южной (при строительстве дороги по ул. Атаманской) и восточной сторон (при межевании участков и возведении заборов частных владений). С севера повреждений было меньше, но вся периферия кургана, за исключением небольшого участка в его западной части, оказалась недоступна для исследования (рис. 1, В). Под первой центральной земляной конструкцией в кургане, которая была в наибольшей степени разрушена грабителями, стремившимися попасть в центральное погребение, был заложен разрез Ес1п-18, под второй, третьей и четвертой – разрезы Ес2п-18, Ес3п-18, Ес4п-18 соответственно (рис. 1, Г). Все разрезы были заложены в центре и вдоль северной половины западного фаса центральной бровки кургана на расстоянии 6–14 м друг от друга. Нарушений поверхности погребенной почвы на протяжении всей изучаемой бровки отмечено не было. Разрез Ес5ф-18 современной почвы расположен в 30 м к северу от кургана на залежном участке на территории частного владения (последняя распашка более 25 лет назад), заросшем сорной травой, а также редкими 2–3-летними деревьями грецких орехов. Буква “п” в номере разреза указывает, что почва погребенная, буква “ф” – фоновая/современная. Почвенные горизонты получили индексы по классификационной системе WRB-15 [33].

Проведено полевое морфологическое описание почвенных профилей, цвет горизонтов определяли по шкале Манселла. В каждом изученном разрезе отобрали образцы с интервалом 10 см из верхнего метра и 20 см – из второго метра профиля. Также отобрали образцы для спорово-пыльцевого (палинологического) анализа с глубины 0–5 см из профилей погребенных почв.

В лаборатории образцы были высушены, растерты и пропущены через сито 1 мм для общих химических анализов, через сито 0.25 мм – для определения органического углерода и магнитной восприимчивости. Затем были определены: содержание органического углерода – метод Тюрина в модификации Антоновой с соавт., при этом содержание выделившегося при окислении CO<sub>2</sub> определяли на хроматографе [25]; CO<sub>2</sub> карбонатов – манометрически по разнице давлений в контроле и образце в герметичных сосудах с резиновыми пробками, в которых образцы реагировали с 10%-ной HCl, результаты затем пересчитаны на C [7]; pH водной вытяжки при соотношении вода : : почва 2.5 : 1; гигроскопическая влага; SO<sub>4</sub> гипса – весовым методом; сумма обменных оснований – методом вытеснения раствором CH<sub>3</sub>COONH<sub>4</sub>, с последующим определением K и Na пламенно-фотометрическим методом, а Ca и Mg – комплексно-нометрически [4]; гранулометрический состав – методом пипетки с использованием пирофосфата натрия для диспергирования, фракции рассчита-

ны на абсолютно сухую навеску с учетом определения гигроскопической влаги [6]. Измерения удельной магнитной восприимчивости проводили в лабораторных условиях с помощью прибора Carrbridge KLY-2 в Центре коллективного пользования ИФХиБПП РАН. Для обработки результатов исследований и построения графиков использовали программы Microsoft Excel, CorelDraw. Микроморфологический анализ шлифов из разрезов Ес1п-18, Ес4п-18 и Ес5ф-18 проводили на микроскопе AxioScope A1 Carl Zeiss (Германия) в Центре коллективного пользования ИФХиБПП РАН.

Палинологический анализ был выполнен Т.Ф. Трегуб (Воронежский государственный университет) по модифицированной методике В.П. Гричука [12]. Модифицированная методика позволяет в процессе обработки образцов избавиться как от пленки железисто-алюмосиликатного состава, которая может сокращать выход органической фракции при мацерации, так и от сильноразбухающих глинистых минералов, которые могут налипать на зерна спор и пыльцы, препятствуя тем самым разделению минеральной и органической фракции. Навеска образца – 70–100 г. Образцы заливали 10%-ным раствором HCl, кипятили 10–15 мин до прекращения реакции. Контроль – быстрое осаждение породы за 0.5 ч. Образование суспензии означало, что реакция прошла не до конца. В этом случае описанные приемы повторяли. С целью разрушения железисто-алюмосиликатной пленки увеличивали время кипячения образца с соляной кислотой до перехода окисного железа в закисное, то есть до приобретения осадком серовато-зеленоватого оттенка. Образец промывали водой, слив производили через 3 ч. Затем осадок переводили в литровые цилиндры для отмучивания со сливом воды через 3 ч (пыльца в данном столбе воды оседает через 2–2.5 ч). Высоту сливаемого столба воды постепенно доводили до 30 см, так, чтобы нетронутым оставался слой в 5 см. Отмучивание осадка прекращали на 5–6 сутки, столб воды после осаждения породы был прозрачным. Разделение минеральной и органической фракций производили с помощью общеизвестных приемов, с использованием тяжелой жидкости. Применение вышеописанной методики в значительной степени способствовало достижению высокой насыщенности спорами и пыльцой препаратов при однократном обогащении породы [29]. Определения принадлежности спор и пыльцы к определенным семействам, секциям, родам и видам, проводили с помощью оптического микроскопа на основе различий в морфологическом строении микрофоссилий (форма зерна, наличие трехлучевой трещины, зародышевой борозды, апертуры или поры, воздушных мешков или гофрированной оторочки и др.), с учетом структурных и скульптурных осо-

бенностей строения экзины (верхнего слоя оболочки зерна).

Палинологический анализ проводили в восьми пробах, но лишь в пяти из них были получены валидные палиноспектры. Это пробы, отобранные из первой грунтовой конструкции над единственным центральным в кургане погребением из материала, имевшего признаки оглеения и гумусированного материала без таких признаков; пробы из 0–5 см разрезов Ес2п-18, Ес4п-18 и Ес5ф-18. В остальных трех пробах отмечены лишь единичные зерна хвойных пород (*Pinus*, *Picea*) и спор семейств *Polypodiaceae* и *Sphagnaceae*, для построения диаграммы эти пробы не использовали.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

**Конструкция кургана.** Курган был сооружен на пологом склоне, угол наклона около 1° с севера на юг (рис. 1, Г). В кургане археологами было выделено шесть грунтовых и три каменных (две разновременные крепиды и кромлех) конструкции, которые из-за нарушений полы кургана не полностью читались на фасах центральной бровки, но были отчетливо прослежены на боковых. В центральной бровке сохранились четыре грунтовые и две каменные конструкции, которые были изучены при палеопочвенном анализе и схематически представлены на рис. 1, Г и частично на рис. 1, Д.

Вначале, при сооружении первой грунтовой конструкции, центральное погребение было оконтурено двумя невысокими, ориентированными в широтном направлении валиками из буровато-желтого материала, взятого из глубоких горизонтов ямы основного погребения (так называемый “выкид”). Затем между этими валиками выкладывались глинобитные слои более темного гумусированного материала и более желтого, которые чередовались между собой. Слои имели чашеобразный прогиб, в составе слоев помимо мелкозема присутствовала мелкая каменная крошка размером от 3–4 мм до 1–2 см, приуроченная больше к темным слоям, чем к желтым. Длина слоев кверху кургана постепенно уменьшалась, и чередующиеся слои в бровке образовывали почти правильную пирамиду или конус (рис. 1, Д, конструкции 2, 3). Из-за того, что центр кургана с самого верха и вплоть до основного погребения был нарушен просадкой грунта после обрушения перекрытия погребения и более поздней грабительской ямой, верхняя часть первой грунтовой конструкции была видна нечетко (рис. 1, Г). Пирамидальная форма первой грунтовой конструкции скорее угадывалась, чем была видна. Кроме этого, центр был смещен к северу из-за того, что грабительская яма прорезала южную часть первой и второй грунтовых конструкций.

Вторая грунтовая конструкция была сделана так же, как и первая — валики по внешней границе и между ними чередующиеся темные и желтые слои с чашеобразным прогибом, образующие пирамиду. В данном и во всех последующих случаях желтый грунт для валиков брался уже не из ямы основного погребения, а с прилегающей к кургану территории. Вторая пирамида была видна гораздо более четко, как на южной (рис. 1, Д, конструкция 2), так и на северной сторонах западного фаса центральной бровки, поскольку выходила за пределы грабительской ямы. В первой и второй конструкциях самый первый слой, лежащий на погребении и погребенной почве, состоял из материала глеевого горизонта с характерной сизовато-голубоватой окраской и множеством охристых пятен. Вероятно, такая выкладка оказала диагнетическое влияние на погребенные под этими конструкциями почвы, поскольку в самом верху (0–5 см) разрезы Ес1п-18 и Ес2п-18 имели пятна ожелезнения, хорошо прослеженные при микроморфологическом анализе. Остальной материал во всех курганных конструкциях, который имел более темный цвет брался, предположительно, из материала гумусового горизонта (Ah), более желто-палевый — из горизонтов AhB или Bk.

Третья и четвертая грунтовые конструкции также имели в основании своего внешнего контура небольшие валики, но внутри третьей конструкции появились заметные различия в структуре слоев на западном и восточном фасах бровки. На участке северной половины восточного фаса центральной бровки чередующиеся слои темного и желтого материалов, которые были прослежены на западном фаса, были заменены пачками разнородного материала, внутри пачек имеющего наклон согласно склону курганной конструкции. Пачки были отделены друг от друга четкими горизонтальными тонкими прослоями. В третьей конструкции с северной стороны восточного фаса центральной бровки прослеживается 5–6 таких пачек (рис. 1, Д, конструкция 3). В четвертой грунтовой конструкции опять темные и желтые слои чередуются, залегание прослоек было субгоризонтальным, отчетливо выражено усиление окарбонирования материала, из которого сделана эта конструкция (рис. 1, Д, конструкция 4). В третьей и четвертой конструкции каменной крошки в темных слоях было существенно меньше или она отсутствовала.

Первая каменная конструкция — кромлех — представляла из себя каменные плиты размером 1.2(1.5) × 0.6(0.8) м, выставленные на торцы, плотно одна к другой, по периметру основания всей курганной конструкции. Камни второй (ранней) и третьей (поздней) каменной конструкций лежали в однородном палево-сером окарбонированном материале, который, предположительно, использовался как цемент, в нем или им закрепляли кам-

ни. В этом материале не прослеживаются никаких слоев, он однородный. Вторая и третья каменные конструкции видны лишь с северной стороны кургана, поскольку в южной его части камни уходят под дорогу вдоль улицы и частично были использованы при строительстве этой дороги. При просмотре кургана сверху (рис. 1, В) четко видна двуслойность каменной выкладки (различаются две последовательные крепиды) с его северной стороны: нижняя часть — вторая каменная конструкция (крепида I) и верхняя — третья каменная конструкция (крепида II). Каменный материал в каменных конструкциях, как крупные плиты, так и относительно мелкие камни — это бештаунит (щелочной пироксен-амфиболовый трахилипарит) — горная порода, получившая свое название от горы Бештау и добытая древними строителями, по-видимому, на осыпях с горы Шелудивой (в 6 км на С–В по прямой или в 8 км по дорогам от кургана), или, возможно, с самой горы Бештау (около 9 км к С–ВВ от кургана по прямой и несколько больше — по дорогам). Кроме этого, в крепидах II (третья каменная конструкция) зафиксировано использование отдельных речных галек и булыжника.

На относительную узость хронологического отрезка времени (в несколько десятилетий), который понадобился древним строителям для возведения кургана, помимо радиоуглеродных дат для первой и третьей грунтовых конструкций, указывают ряд косвенных признаков, зафиксированных в ходе раскопок, и некоторые умозрительные выводы. Среди них отчетливо видимый единый архитектурный план строительства кургана, который был возведен над единственной могилой (центральное погребение); единые строительные приемы, использованные при сооружении различных его конструкций составляющих курган, в некоторых случаях их тесная взаимосвязь, и при этом заметные отличия на различных участках одной конструкции, которые могут быть объяснены небольшими временными (вероятно, сезонными) перерывами в строительстве; идентичная керамика, найденная во всех конструкциях кургана и за его пределами на ритуальной/поминальной площадке, а также наличие поблизости множества других, в том числе крупных майкопских курганов [21, 24]. Кроме этого, все грунтовые конструкции кургана Ессентукский 1, за исключением первой, нарушенной грабителями, на фасах центральной бровки имели четкие и резкие границы, чего не должно было быть, если бы курганные конструкции строились со значительными временными перерывами. Например, такие перерывы были четко диагностированы в поле и в дальнейшем подтверждены исследованиями в лаборатории по сформировавшимся на курганных конструкциях инициальным почвам в Большом

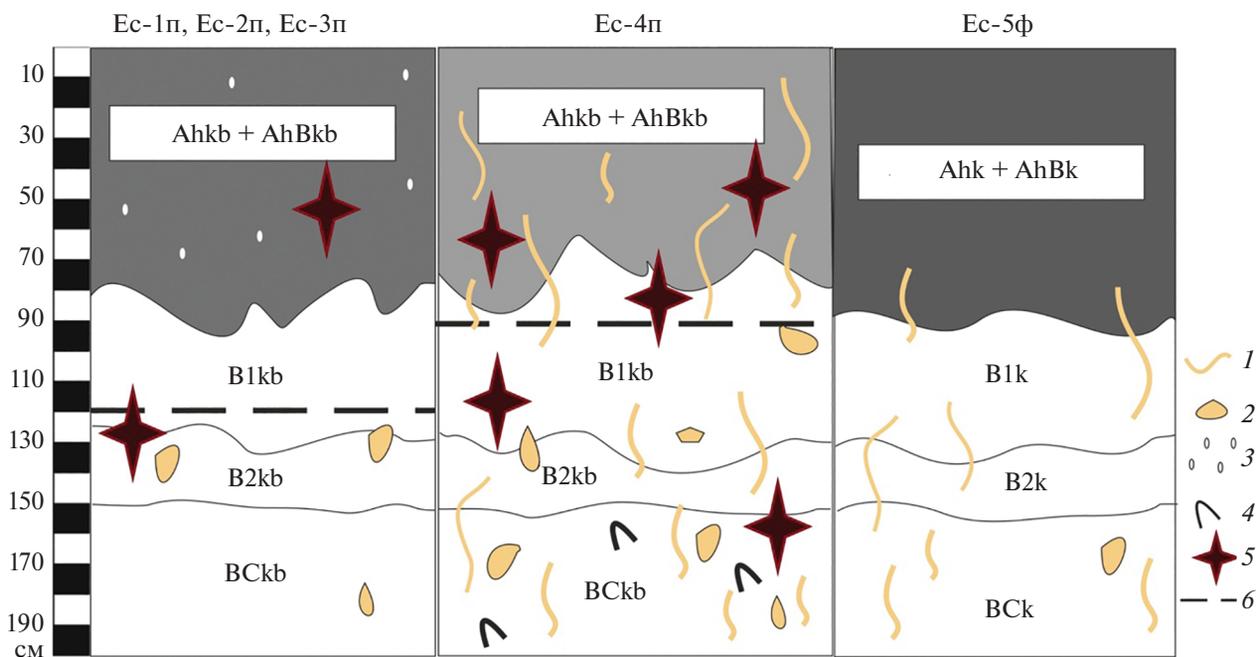


Рис. 2. Схемы морфологического строения почв коротковременного хроноряда: разрезы Ec1п-18, Ec2п-18, Ec3п-18, Ec4п-18 и Ec5ф-18: 1 – карбонатный псевдомицелий, 2 – белоглазка, 3 – карбонатная пропитка, 4 – прожилки гипса, 5 – зоотурбации, 6 – глубина залегания сегрегированных карбонатных новообразований.

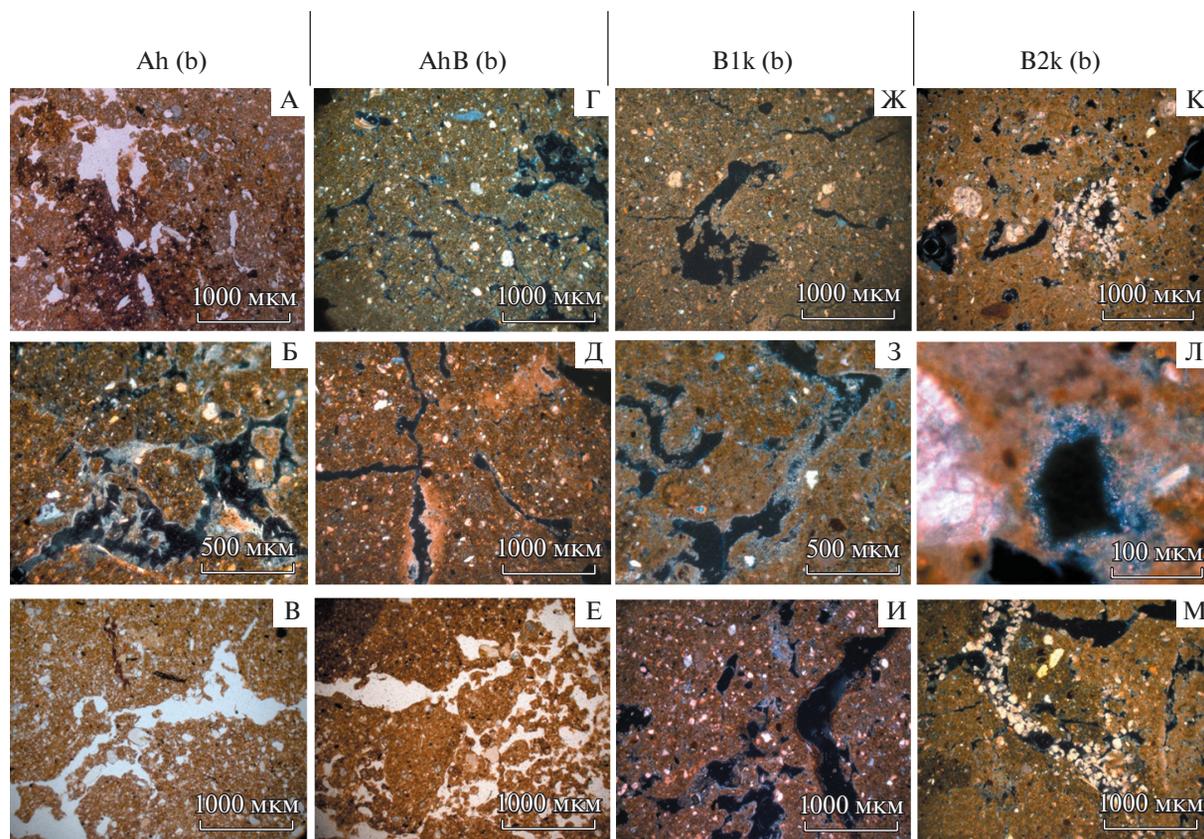
Ипатовском кургане, исследованном ранее в Ставропольском крае [3].

**Морфологический анализ** показал, что погрёбенные почвы имели следующее строение профиля: Ahkb (глубина до 45 см), AhBkb (до 80 см), B1kb (до 120 см), B2kb (до 150 см) и BCkb–Ckb (до 200 см) (рис. 2). Все разрезы вскипали от HCl с поверхности.

От центра к периферии кургана наблюдалось четкое усиление степени окарбоначенности и перерывности землероями верхних горизонтов погрёбенных почв. Верхний гумусовый горизонт палеопочв в разрезах Ec1п-18, Ec2п-18, Ec3п-18 имеет схожие характеристики: серый цвет почвенного материала с белесым оттенком от карбонатной пропитки (10YR 3/2–4/2 – темный серовато-коричневый), комковатая структура, изрытость, червеходы протяженные и покрашены гумусом. Палеопочва разреза Ec4п-18 отличается по цвету гумусового горизонта – 10YR 5/2 – серовато-коричневый, светлее предыдущих, белесый оттенок в местах скопления карбонатного псевдомицелия достигает градаций в цвете 2.5YR 8/1 – белый, червеходы чаще окарбоначены, чем покрашены гумусом. Если в верхних горизонтах первых трех разрезов карбонаты не имеют сегрегированных форм и представлены в виде слабой пропитки, то в разрезе Ec4п-18 наблюдается четко выраженный псевдомицелий. Во всех профилях в горизонтах Bkb встречается белоглазка, но если в первых трех профилях она имеет нечеткие

расплывчатые границы, диаметр не превышает 3, редко 5 см, встречается уверенно с глубины 110–120 см, то в разрезе Ec4п-18 диаметр белоглазки в большинстве случаев около 5 см, она начинает встречаться с глубины 80 см. Лишь в этой почве на глубине 170–200 см четко идентифицируются прожилки гипса, в остальных трех почвах слабый блеск от этих прожилок виден лишь в дне разреза. Почвы первых трех разрезов классифицированы как черноземы обыкновенные мощные легкоглинистые на карбонатных лёссовидных глинах (Calcic Chernozems (Loamic, Pachic)), почва четвертого разреза – чернозем южный легкоглинистый на карбонатных лёссовидных глинах (Haplic Calcisol (Loamic)).

Профиль изученной современной почвы идентичен по набору горизонтов и их мощности, за исключением верхнего бывшего пахотного горизонта, который за время нахождения почвы в залежном состоянии начал разрыхляться корнями травянистой растительности, верхние 10 см уже представляют собой густо переплетенную корнями дернину, граница бывшего пахотного горизонта выражена неясно на глубине 20–25 см. Карбонатные налеты по граням педов и псевдомицелий появляются на глубине 60 см, которые сменяются горизонтом хорошо выраженного карбонатного псевдомицелия до 120 см, ниже отмечаются пятна белоглазки с неясными границами, прожилок гипса заметно не было. Современная почва так же, как и почвы в первых трех разрезах, класси-



**Рис. 3.** Микроморфологическое строение почв коротковременного хроноряда, сверху обозначены почвенные горизонты, А, Г, Ж, К – разрезы Ес1п-18; Б, Д, З, Л – разрез Ес4п-18; В, Е, И, М – разрез Ес5ф-18. Фото А, В, Е сняты без анализатора, остальные – с анализатором. Пояснения к фото – см. текст.

фицируется как чернозем обыкновенный мощный легкоглинистый на карбонатных лёссовидных глинах (Calcic Chernozems (Loamic, Pachic)).

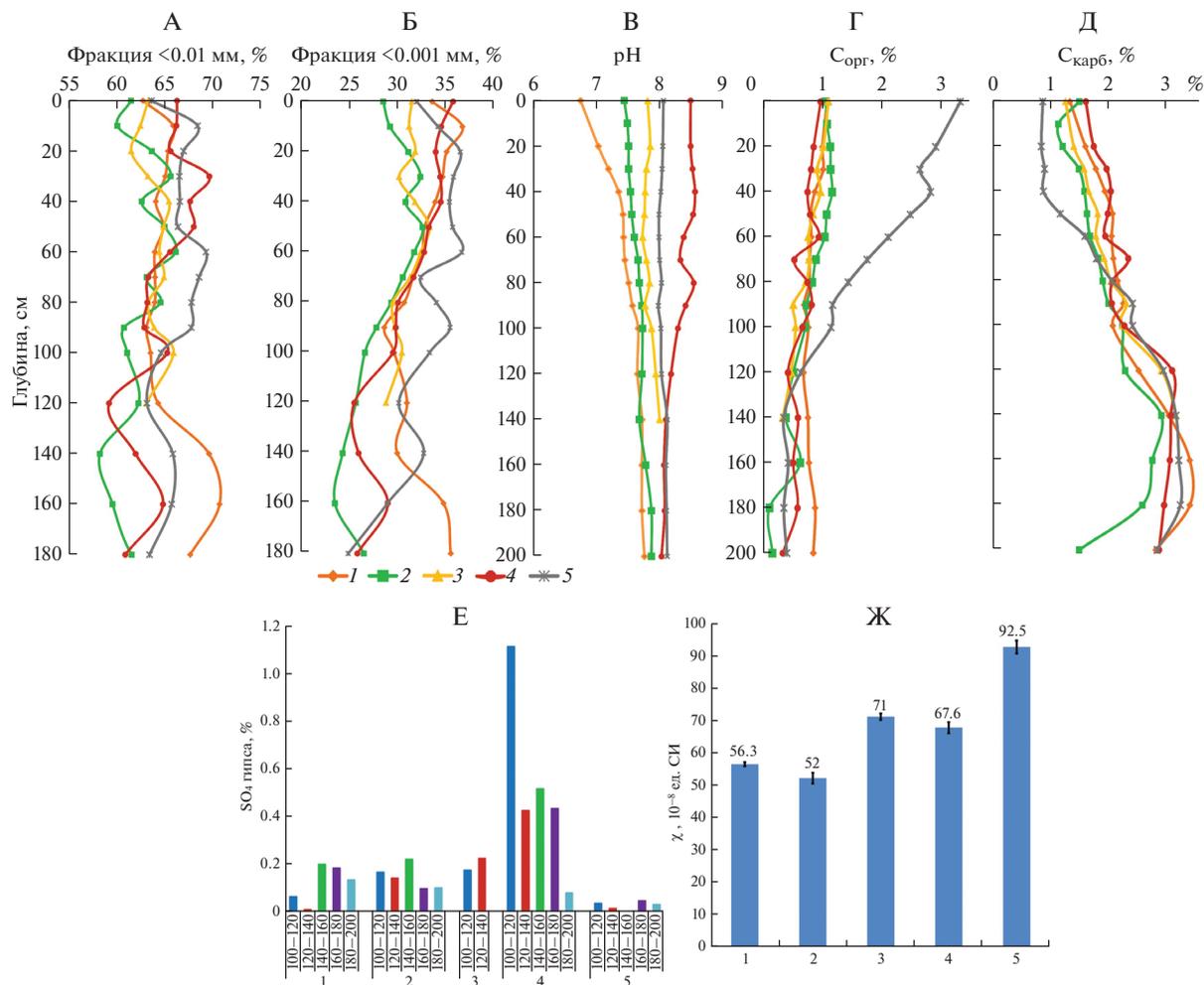
**Микроморфологический анализ** позволяет отметить, что во всех трех рассматриваемых разрезах в горизонте Ahb, 5–10 см, хорошо заметны признаки биогенной активности – выбросы мезофауны в порах; а также окарбоначенность тонкодисперсной массы (ТДМ) (рис. 3, А–З, В). Множество зерен биогенных карбонатов, представляющих собой обломки раковин моллюсков, присутствует как в рассматриваемом горизонте, так и в других горизонтах во всех изучаемых почвах, мы отнесли этот признак к литогенному окарбоначиванию и в дальнейшем не обсуждаем. В разрезе Ес1п-18 отмечаются пятна ожелезнения поверх ТДМ, а степень окарбоначенности почвенной массы в целом слабая. В почве разреза Ес4п-19 биогенные выбросы и поры покрыты игольчатым кальцитом, пропитка ТДМ карбонатами существенно больше, встречаются отдельные зерна спарита. В современной почве разреза Ес5ф-18 отмечаются свежие растительные остатки, видны отдельные зернистые агрегаты, ТДМ имеет

железисто-глинистый состав, пропитка карбонатами ТДМ очень слабая.

В горизонте AhBb, 60–65 см, биогенные признаки сохраняются – выбросы мезофауны и зернистые агрегаты, увеличивается степень пропитки ТДМ карбонатами по сравнению с вышележащим горизонтом (рис. 3, Г, З, Е). В разрезе Ес4п-18 отмечаются микроучастки уплотнения карбонатной ТДМ с порами-каналами, в которых располагаются карбонатные стяжения, сложенные микритом. Иногда такие же стяжения отмечаются в почвенной массе (рис. 3, Д).

В горизонте B1kb, 82–87 см, биогенное измельчение почвенной массы фрагментарное, почвенная масса консолидирована и пропитана карбонатами (рис. 3, Ж–И). Но лишь в разрезе Ес4п-18 карбонатные стяжения, сложенные микритом и игольчатым кальцитом, присутствуют в порах-каналах (рис. 3, З). В разрезе Ес5ф-18 очень мелкие карбонатные стяжения, сложенные мелкоигольчатым кальцитом, отмечены в округлых пустотах и порах-камерах (рис. 3, И).

В горизонте B2kb, 142–147 см, во всех почвах отмечается максимальная в профиле степень окарбоначенности ТДМ, здесь присутствуют мелкие



**Рис. 4.** Профильное распределение фракций <math><0.01\text{ мм}</math> (А) и <math><0.001\text{ мм}</math> (Б); рН  $H_2O$  (В);  $C_{\text{орг}}$  (Г);  $C_{\text{карб}}$  (Д);  $SO_4$  гипса (Е); и удельной магнитной восприимчивости (Ж) в почвах изученного коротковременного хроноряда. Разрезы: 1 – Ес1п-18; 2 – Ес2п-18; 3 – Ес3п-18; 4 – Ес4п-18; 5 – Ес5ф-18.

микритовые карбонатные стяжения, а в порах – скопления спаритовых зерен (рис. 3, К–3, М). Лишь в разрезе Ес4п-18 зафиксированы мелкие, видимые лишь при самом большом возможном при просмотре под световым микроскопом увеличении гипсовые кристаллы (рис. 3, Л, центр кадра).

**Анализ гранулометрического состава** показывает, что в исследуемых почвах физическая глина (размер частиц <math><0.01\text{ мм}</math>) составляет от 60 до 70%, физический песок (размер частиц <math>>0.01\text{ мм}</math>) от 30 до 40%, а илстая фракция (размер частиц <math><0.001\text{ мм}</math>) до 37% (рис. 4, А, 4, Б).

Распределение этих фракций по профилям как погребенных, так и современных почв позволяет сделать вывод о том, что рассмотренные профили однородны по гранулометрическому составу, который можно охарактеризовать по классификации Н.А. Качинского как легкая глина. Следовательно, мы можем сравнивать остальные измерен-

ные свойства наших почв напрямую, без расчета их относительных величин.

**По величинам рН<sub>Н2О</sub>** (рис. 4, В) выделяется палеопочва Ес4п-18 с самыми большими значениями этого показателя по всему профилю, 8.1–8.5, тогда как в современной почве – от 8.0 до 8.1, а в палеопочвах Ес1п-18, Ес2п-18, Ес3п-18 – от 6.9 до 7.9. При этом до глубины 80 см почва разреза Ес4п-18 показывает самые щелочные значения рН среди всех изученных почв хроноряда.

**Содержание органического углерода ( $C_{\text{орг}}$ )** во всех палеопочвах меньше по сравнению с современной почвой, что обусловлено диагенетической минерализацией органического вещества в процессе погребения почв (рис. 4, Г). В современной почве верхний гумусовый горизонт содержит 3.3%  $C_{\text{орг}}$  против 1% на тех же глубинах в палеопочвах. Для современной почвы отмечается аккумулятивный тип распределения органического ве-

щества, характеризующийся максимальным накоплением гумуса с поверхности при постепенном падении содержания с глубиной. Содержание  $C_{орг}$  в погребенных почвах также постепенно снижается и колеблется в пределах 0.3–0.5% во втором метре профиля.

Среди погребенных почв наименьшие значения  $C_{орг}$  в верхнем полуметре наблюдаются в палеопочве, погребенной в конце строительства кургана – разреза Ес4п-18, а наибольшие – в разрезе Ес2п-18. Наиболее четкая разница видна при пересчете данных на исходное содержание  $C_{орг}$  до захоронения, когда предполагается, что в палеопочвах за более чем 5000-летний период минерализовалось до 70% от исходного содержания этого вещества [19]. Можно отметить, что исходное содержание  $C_{орг}$  в палеопочвах разреза Ес1п-18, Ес2п-18, Ес3п-18, погребенных поочередно друг за другом, сопоставимо с содержанием в современной почве, если учесть небольшое убывание органического вещества из верхнего горизонта современной почвы в результате былой распашки. Тогда как в разрезе Ес4п-18 исходное содержание  $C_{орг}$  практически во всем верхнем полуметре меньше, чем в современной залежной почве.

В распределении **углерода карбонатов** ( $C_{карб}$ ) по профилям изученных почв (рис. 4, Д) отмечается ясная тенденция увеличения его содержания в нижней части профиля. В верхнем полуметре профиля значения содержания  $C_{карб}$  в палеопочвах варьируют от 1.2 до 2.0%, при этом максимальные показатели в этой части профиля характерны для разреза Ес4п-18. В фоновых почвах содержание  $C_{карб}$  по профилю увеличивается от 0.9% в верхней части профиля до 3.0% в средней части. Максимумы профилейного содержания  $C_{карб}$  для палеопочвы разреза Ес4п-18 отмечаются на глубине 70 и 120 см, а для всех остальных почв, включая современную, максимумы расположены ниже – на глубине 90 и 140–160 см. В верхней части профиля современной почвы примерно до глубины 60 см содержание  $C_{карб}$  заметно меньше, чем в погребенных почвах.

В **содержании гипса** четко прослеживается увеличение во втором метре профиля палеопочв рассматриваемого коротковременного хроноряда от начала к концу строительства кургана. Максимальное значение отмечается в палеопочве Ес4п-18 на глубине 100–120 см и составляет 1.1%. В трех других погребенных почвах и в современной значения не превышают 0.3% (рис. 4, Е).

Для оценки распределения и состояния соединений железа в почвах и ландшафтах используется величина **магнитной восприимчивости** почв, которая измеряется инструментально и выражается величиной  $\chi$  в единицах СИ. Если магнитная восприимчивость измеряется в лабораторных услови-

ях с учетом массы навески, она называется удельной. Величина магнитной восприимчивости зависит от факторов почвообразования. Как показали исследования последних лет [31], существует прямая связь между приростом магнитной восприимчивости в почвенном профиле и среднегодовыми атмосферными осадками: чем больше осадков, тем больше магнитная восприимчивость в автоморфных почвах степной зоны. Это объясняется реакцией железоредуцирующих бактерий, находящиеся в гумусовом горизонте, которые реагируют на климатические изменения [17].

При педогенезе происходит изменение  $\chi$  почв по сравнению с  $\chi$  материнской породы, величина которой зависит от факторов почвообразования. В автоморфных почвах, развивающихся в окислительных условиях, величина  $\chi$  по сравнению с почвообразующей породой возрастает, а в восстановительных, как правило, уменьшается [5]. По нашим наблюдениям при заметной доле в составе обменных оснований обменного магния и натрия величина магнитной восприимчивости обратно коррелирует с этими величинами.

Анализируя полученные данные (рис. 4, Ж) отмечаем, что современные почвы характеризуются наибольшими значениями  $\chi$  по сравнению с палеопочвами. Величина удельной магнитной восприимчивости, измеренной в верхних 0–10 см профилей палеопочв, колеблется от  $52 \times 10^{-8}$  до  $71 \times 10^{-8}$  ед. СИ, тогда как в современных почвах отмечаются величины  $>92 \times 10^{-8}$  ед. СИ. Некоторое уменьшение величин  $\chi$  в почвах разрезов Ес1п-18 и Ес2п-18 по сравнению с остальными подкурганскими почвами мы связываем с их диагенетическим изменением в результате влияния материала глеевого горизонта, выложенного на их поверхность. А в тех почвах, которые не затронуты “диагенетическим ожелезнением” сверху, прослеживается обратная связь с долей обменных магния и натрия в сумме обменных оснований.

В составе **обменных оснований** во всех изученных почвах, безусловно, преобладает кальций, составляя более 75% от суммы катионов. Содержание магния колеблется от 8% в современных почвах до 21% в палеопочвах разрезов Ес1п-18, Ес2п-18, Ес3п-18, и от 23 до 29% в разрезе Ес4п-18 (рис. 5). Скорее всего, это связано со спецификой литогенного фона данной территории – обогащение исходных почвообразующих пород обменным магнием. Вместе с тем и содержание обменного Na заметно различается в почвах рассматриваемого хроноряда.

В палеопочве Ес4п-18, погребенной последней в изучаемом коротковременном хроноряду, отмечается наибольшее содержание как обменного натрия, так и магния в составе обменных оснований. Содержание обменного Na достигает 4.4% во втором метре профиля. В других палеопочвах

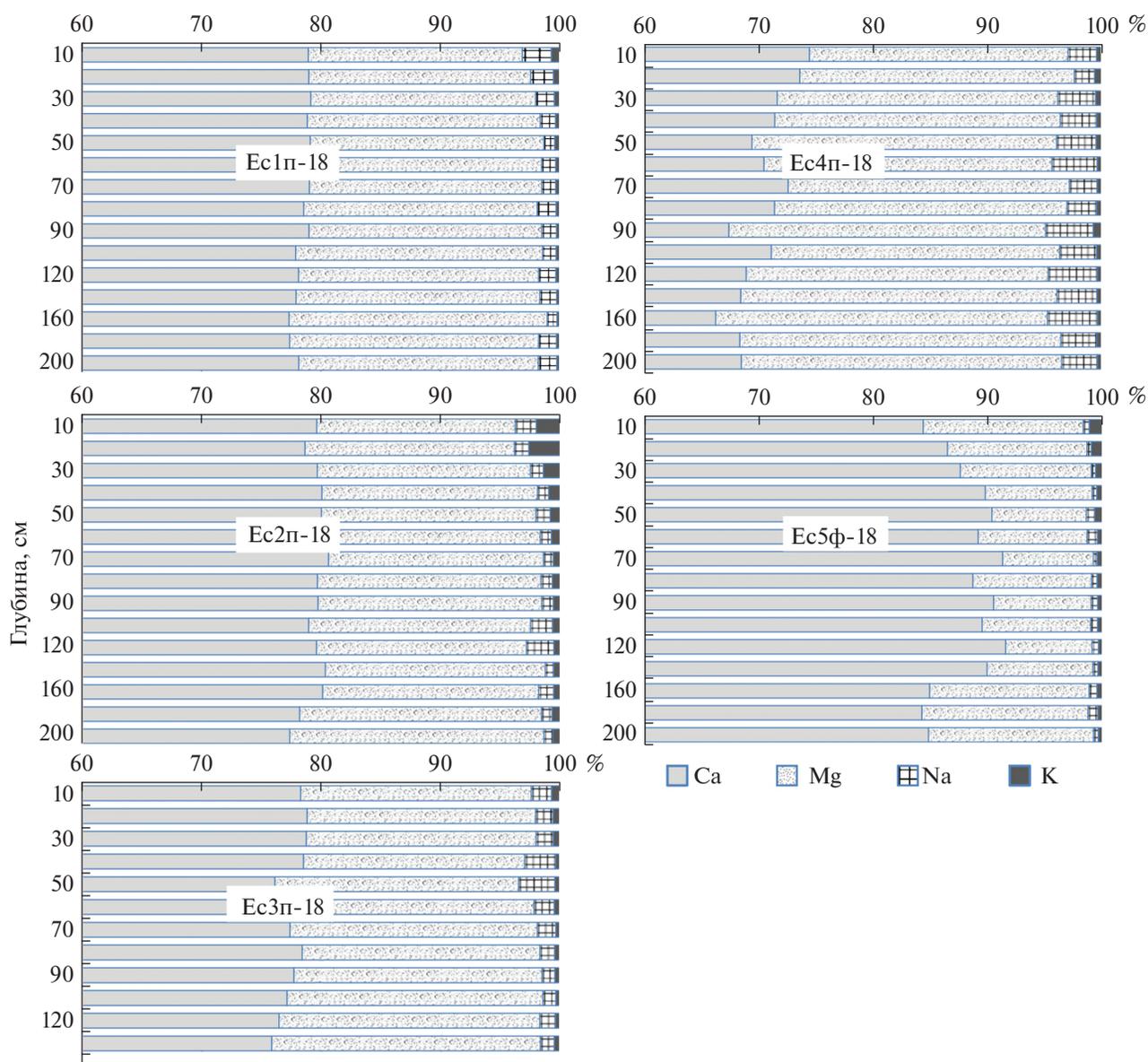


Рис. 5. Состав обменных оснований в изучаемых почвах коротковременного хроноряда.

значения содержания этого элемента в составе обменных оснований колеблются от 0.7 до 3% по всему профилю. Современные почвы характеризуются наименьшим содержанием обменного натрия – от 0.3 до 0.9% по всему профилю (рис. 5).

На диаграмме, составленной по данным спорово-пыльцевого анализа, выделены три палинозоны (рис. 6).

И палинозона объединила пробы-повторности, отобранные из материала первой грунтовой курганной конструкции над основным погребением. Здесь доминирует пыльца хвойных пород. Хвойные группировки слагались соснами секции *Sula* и сосной обыкновенной (*Pinus sylvestris*) с заметным участием ели (*Picea*) и единично пихтой (*Ab-*

*ies*) и можжевельником (*Juniperus*). Данные сообщества занимали в основном горные склоны. В долинах, ущельях были развиты буково-ореховые леса (*Fagus-Juglans*) с участием вяза (*Ulmus*), граба (*Carpinus*), реже – дуба (*Quercus*). Подлесок был образован лещиной (*Corylus avellana*) и жасминовыми куртинами (*Jasminium*). Ольховые (*Alnus*) заросли тяготели к береговой линии водоемов.

Состав травянистого покрова отражает, в основном, луговые сообщества и травянистые группировки, характерные для полей и лесных опушек.

Споровые растения, особенно заметные в пробе из оглеенного материала первой конструкции, и их состав указывают на близость переувлажненных грунтов с обилием сырых остатков древесины, а

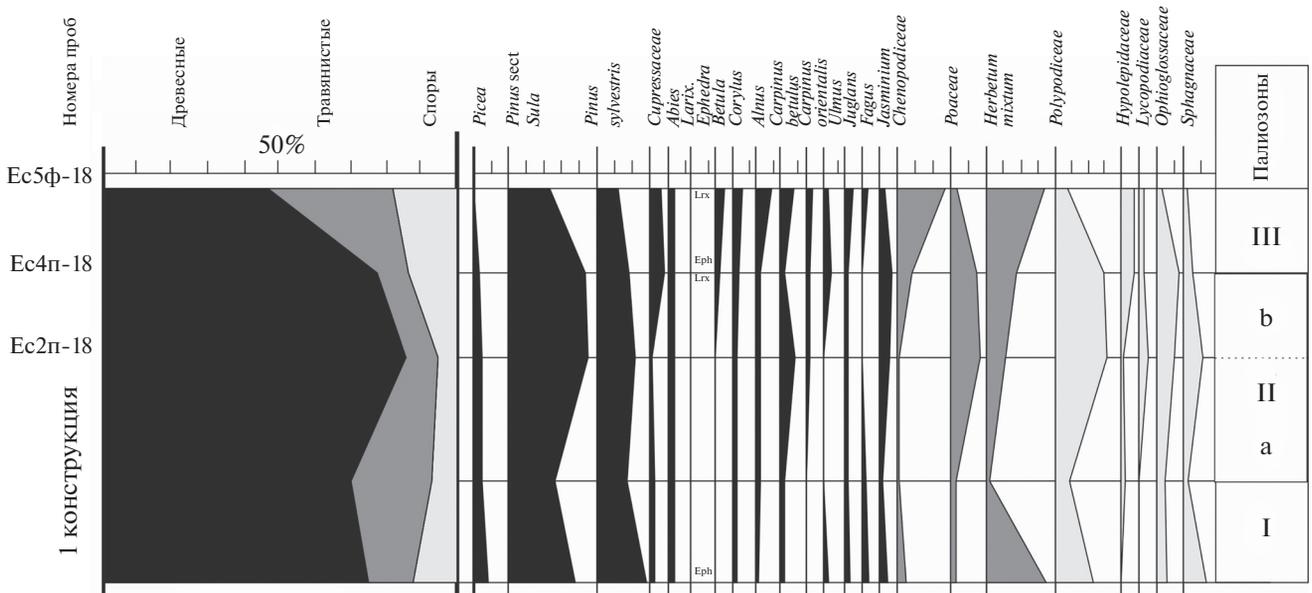


Рис. 6. Спорово-пыльцевая диаграмма погребенных и современных почв и слоев курганной конструкции кургана Ессентукский I.

также на наличие небольших верховых сфагновых болот.

II палинозона объединила пробы, отобранные из верхних 0–5 см погребенных под курганом почв, разрезов Ес2п-18 и Ес4п-18. Палинозона характеризуется развитием в долинах грабовых и буковых группировок, возможно, разрозненных территориально. По склонам широкое развитие получают грабинники (рис. 6, палинозона IIa), которые в верхней части палинозоны уступают свою роль вязовым зарослям (рис. 6, палинозона IIb). Высокие отметки склонов были заняты хвойными лесами, но количество ели заметно снижается по сравнению с I палинозой. Климат, оставаясь достаточно теплым, становится суше, и в конечные фазы палинозоны в составе растительности появляется хвойник (*Ephedra*) – типичный серофит.

Обилие в составе травянистой растительности представителей семейства злаковых (*Poaceae*) свидетельствует о заметном остепнении луговых сообществ на данном этапе. Состав спор указывает на близость водоема с частичным заболачиванием береговой линии.

III палинозона отражает современное интегральное состояние растительного покрова на основании изучения пробы из верхних 0–5 см разреза Ес5ф-18. Наблюдается некоторый подъем границы развития хвойных лесов, на что указывает возрастание значения пыльцы можжевельника. Становятся разнообразнее в видовом отношении широколиственные леса с участием граба, вяза, ореха грецкого и бука. Грабинники расши-

ряют свой ареал практически до прежних границ. Вблизи береговой линии водоема развиты березово-ольховые заросли. Скотоводство приводит к тому, что выбитые скотом луга высокой поймы занимают лебедовые группировки, а пойменные участки и временно подтопляемые территории находятся под луговым разнотравьем.

Среди спор заметную роль играют представители гиполеписовых (*Hypolepidaceae*), которые в экологическом отношении тяготеют к лесным опушкам, к горным смешанным лесам, лесным лугам.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Сравнительный анализ количественных и качественных морфологических, физико-химических и палеоботанических свойств палеопочв коротковременного хроноряда, погребенного под курганом раннего бронзового века Ессентукский I, дает возможность реконструировать направленность и масштабы изменчивости температур и атмосферной увлажненности, а также рассмотреть особенности эволюции почв.

Морфологические и физико-химические свойства изученных палеопочв показывают не только направленность изменений климата, но и вариативность почвенных свойств. Представилась возможность изучить вариативность свойств палеопочв, отнесенных к одному и тому же этапу строительства кургана в раннее майкопское время, так как палеопочвы, расположенные ближе к центру кургана, были погребены друг за другом очень быстро, что подтверждается археологиче-

скими данными, а также тем, что почвы в разрезах Ес1п-18, Ес2п-18 и Ес3п-18 обладают схожими свойствами. Мы можем рассматривать их как единый объект и сравнивать усредненные для них значения, как с современной почвой, так и палеопочвой разреза Ес4п-18, демонстрирующей очевидно отличающиеся свойства.

За время функционирования кургана произошла деградация гумусового профиля, что отражается в его осветлении в разрезе Ес4п-18 по сравнению с тремя другими подкурганными почвами. Соли карбонатов и гипса подтянулись к дневной поверхности. По данным как макро-, так и микроморфологического анализа в карбонатном профиле увеличилось количество новообразований и изменились их формы от слабой пропитки с самого верха профиля и редкой белоглазки – в средней части к ясно выраженному псевдомицелию и обилию белоглазки, а также общему увеличению степени пропитки тонкодисперсной массы карбонатами соответственно. Данные лабораторного изучения позволяют отметить в верхней части профиля разреза Ес4п-18 уменьшение содержания органического углерода как по сравнению с ранее погребенными почвами коротковременного хроноряда, так и относительно современных почв, если мы рассматриваем реконструированные значения этого компонента. Содержание углерода карбонатов, гипса, обменного натрия и магния в составе обменных оснований увеличилось, а магнитной восприимчивости – уменьшилось, что свидетельствуют о более аридном климате во время формирования почвы, погребенной в периферийной части кургана по сравнению с теми, что ближе к центру. Для изученного педохроноряда за время его функционирования характерна смена почвенного подтипа черноземов: от обычных мощных легкоглинистых (Calcic Chernozems (Loamic, Pachic)) в центре кургана (разрезы Ес1п-18, Ес2п-18, Ес3п-18) к южным легкоглинистым (Haplic Calcisol (Loamic) – на периферии (разрез Ес4п-18)). Современная почва классифицируется так же, как почвы в центре кургана.

Кроме этого, результаты проведенного исследования иллюстрируют скорость изменения почвенных признаков. За короткий период времени, несколько десятилетий, пока строился курган, отмечается не только смена физико-химического и морфологического облика почв, но и смена почв на уровне подтипа в условиях нарастания аридизации и континентальности климата. В пользу того, что за несколько десятилетий на фоне короткопериодических климатических колебаний в степной зоне могли произойти изменения почв на уровне подтипа можно найти данные в недавней работе [27], где “на основе геоинформационного анализа разновременных почвенных карт были выявлены закономерные трансформации границ почвенных ареалов автоморфных черноземов, связанные с

внутривековой климатической цикличностью, ... приводящей к изменению таксономической принадлежности почв на уровне подтипа”.

Сопоставление свойств палеопочв с изученной современной почвой позволяет предполагать, что палеопочвы раннего майкопского времени формировались в условиях более аридного климата, чем сейчас.

Палинологический анализ, продемонстрировав динамику растительного покрова, независимо от палеопочвенного изучения подтвердил сделанные выводы о палеоклиматической обстановке изучаемого интервала времени. За время строительства кургана фиксируется небольшое сокращение площади лесов и изменение видового состава леса от грабовых лесов к грабово-вязовым лесам, увеличение доли травянистой растительности, остепнение луговых сообществ, появление явных ксерофитов в составе растительных сообществ. Это было связано с изменением влаго- и теплообеспеченности территории. Растительный покров изменился немного, так как период строительства кургана составляет всего несколько десятилетий, что является небольшим временным интервалом для отклика растительных сообществ.

Важно подчеркнуть, что признаки ксерофитизации растительности отчетливо проявляются уже в образце из разреза Ес2п-18, почва в котором ни по морфологическим, ни по аналитическим свойствам практически не отличается от почвы разреза Ес1п-18. Это позволяет предполагать, что в целом строительство кургана совершалось в период довольно интенсивной аридизации климата на данной территории. Именно поэтому так уверенно мы фиксируем подтиповое различие палеочерноземов, погребенных в центре и на периферии кургана несмотря на сравнительно короткий промежуток времени, пока длилось это строительство.

Ранее исследования подкурганых палеопочв начала бронзового века проводили в Ставропольском крае и Предкавказье [3, 8, 32, 34], где отмечается усиление аридных свойств в исследуемый период и в целом реконструируется более засушливый период второй половины среднего голоцена, сопровождавшийся засолением и осолонцеванием почв, что обусловило формирование более южных и континентальных подтипов и родов почв и согласуется с данными, полученными в нашем исследовании. На основе палинологических данных усиление аридизации климата реконструировано в период начала расселения племен майкопской культуры по долинам рек в условиях современных злаковых степей не только в Предкавказье, но и на западном окончании Прикаспийской низменности и на Таманском полуострове [22]. Наличие аридизации климата во второй половине IV тыс. до н. э. на Ергенинской

возвышенности, в Прикаспийской низменности, Южном Приуралье отмечается в ряде работ палеопочвоведов и палинологов [15, 20, 23, 29].

Полученные нами ранее результаты изучения палеопочв Красиковского I курганного могильника в степном Приуралье [30, 35] следует упомянуть при обсуждении полученных результатов по двум причинам. Во-первых, радиоуглеродные археологические даты, полученные для самого раннего кургана I в могильнике Красиковский I, практически совпадают с датами для кургана Ессентукский 1: 3650–3520 для приуральского памятника и 3653–3522, 3637–3521 – для кавминводского. Во-вторых, на основании палеопочвенного анализа курганов в могильнике Красиковский I реконструирован аридный эпизод в интервале от 3600 до 3000 лет cal BC (5600–5000 л. н.), что согласуется с данными, полученными на основе палеопочвенного анализа кургана Ессентукский I в плане направленности изменения климатических условий (усиление аридизации). Необходимо отметить, что ранняя керамика также была обнаружена в изучаемом кургане Ессентукский I, что еще более сближает, в том числе хронологически, эти два кургана, сооруженных в удаленных друг от друга регионах степной зоны Восточно-Европейской равнины. Но если говорить о скорости проявления изменений климата в почвенном профиле, курган Ессентукский I и Красиковские курганы дают совершенно разную информацию: несколько десятилетий в первом случае, порядка 400 лет – во втором, что объясняется разными подходами к датированию этих объектов. Хотя в случае с Красиковскими курганами мы предполагали более быстрое, чем позволяют определить радиоуглеродные даты, изменение свойств почв в выявленном хроноряду [30].

Из-за уникальности изученного археологического памятника в г. Ессентуки и подтверждения, как археологическим материалом, так и отчасти радиоуглеродным датированием сравнительно небольшого временного интервала строительства кургана, проведенное исследование позволяет впервые для столь отдаленного от наших дней времени установить сравнительно короткий временной масштаб изменчивости свойств палеочерноземов, когда за несколько десятилетий происходит смена подтипа чернозема более южным вариантом. Ранее изменения такого же временного масштаба для подкурганых палеопочв в Предкавказье были задокументированы для финала раннего железного века (первые века нашей эры), когда уже существовали письменные источники, и даты сооружения курганов и погребенных под ними почв можно было подтвердить не только радиоуглеродными, но гораздо более надежными археологическими и историческими материалами [8].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Археологические памятники (курганы) степной зоны юга России представляют собой уникальные объекты, своего рода природный архив, сохранивший информацию о голоценовых палеопочвах, о состоянии растительных сообществ, о закономерностях динамики климата и степени ее влияния на эволюцию почв и на ландшафты во второй половине голоцена.

Коротковременной педохроноряд кургана Ессентукский I – уникальный объект для исследования как по возрасту сооружения (майкопская культура, более 5500 л. н.), под которым погребены изученные почвы, так и предполагаемой скорости строительства кургана, несколько десятилетий, что позволяет определить временной масштаб эволюции свойств изученных почв.

От начала к концу строительства кургана менялся морфологический облик и физико-химические свойства почв, а именно, происходило уменьшение мощности гумусового профиля и содержания гумуса, увеличение содержания гипса, карбонатов кальция, перемещение зоны их аккумуляции вверх по профилю, трансформация форм карбонатных новообразований, увеличение доли обменных магния и натрия в составе обменных оснований и снижение магнитной восприимчивости.

Наиболее засушливый облик имеет почва, погребенная последней в изученном хроноряду: гумусовый горизонт наиболее светлый, профиль наиболее сильно обогащен карбонатами, отмечается наиболее высокое содержание обменных магния и натрия в составе обменных оснований и снижение магнитной восприимчивости, максимальная величина содержания гипса во втором метре профиля. Эта почва, классифицируется как чернозем обыкновенный мощный легкоглинистый на карбонатных лёссовидных глинах, *Naptic Calcisol* (Loamic), тогда как остальные палео- и современная почвы – черноземы типичные мощные легкоглинистые на лёссовидных карбонатных глинах, *Calcic Chernozems* (Loamic, Pachic). На основе палеоботанических данных можно отметить, что за время строительства кургана произошло сокращение площади лесов и увеличение доли травянистой растительности, ее остепнение и ксерофитизация, что связано с уменьшением влаго- и увеличением теплообеспеченности территории. Различия не очень велики, что объясняется коротким интервалом между погребением почв.

Исследуемый объект отражает направленность изменения климата в сторону засушливости и увеличения теплообеспеченности в раннемайкопское время, во второй четверти IV тыс. до н. э.

## БЛАГОДАРНОСТЬ

Благодарим директора Евразийского отделения Германского археологического института профессора Свенда Хансена за помощь в радиоуглеродном датировании образцов из кургана Ессентукский I. Глубокую благодарность приносим Т.Ф. Трегуб за выполнение палинологического анализа.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена по теме государственного задания № 0191-2019-0046. Анализы почв выполнены за счет гранта Российского научного фонда, проект № 16-17-10280, а также за счет финансирования со стороны ООО “Наследие” г. Ставрополь.

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Александровский А.Л.* Отражение природной среды в почве // Почвоведение. 1996. № 3. С. 277–287.
2. *Александровский А.Л., Белинский А.Б., Калмыков А.А., Корневский С.Н., Ван дер Плихт Й.* Погребенные почвы Большого Ипатовского кургана и их значение для реконструкции палеоклимата // Материалы по изучению историко-культурного наследия Северного Кавказа. Вып. 2. Археология, антропология, палеоклиматология. 2001. С. 131–143.
3. *Александровский А.Л., Хохлова О.С., Седов С.Н.* Большой Ипатовский курган глазами почвовед // Российская археология. 2004. № 2. С. 61–70.
4. *Аринушкина Е.В.* Руководство по химическому анализу почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1970. 488 с.
5. *Вадюнина А.Ф., Бабанин В.Ф.* Магнитная восприимчивость некоторых почв СССР // Почвоведение. 1972. № 10. С. 56–66.
6. *Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А.* Методы исследования физических свойств почв. М.: Агропромиздат, 1986. 416 с.
7. *Воробьева Л.А.* Теория и практика химического анализа почв. М.: ГЕОС, 2006. 400 с.
8. *Габуев Т.А., Хохлова О.С.* Дробная датировка курганов могильника Брут I (Северная Осетия) // Российская археология. 2012. № 4. С. 16–25.
9. *Геннадиев А.Н.* Почвы и время: модели развития. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1990. 232 с.
10. *Геннадиев А.Н., Горячкин С.В., Дворниченко В.В.* Опыт применения методов почвоведения в исследовании стратификации и морфологии курганных сооружений полупустынной зоны ЕТС // История развития почв СССР в голоцене. Пушино, 1984. С. 233–235.
11. *Гольева А.А., Хохлова О.С.* Реконструкция этапов создания большого Синташтинского кургана (Челябинская область) на основе палеогеографических данных // Известия РАН. Сер. географическая. 2010. № 6. С. 67–76.
12. *Гричук В.П.* Методика обработки осадочных пород, бедных органическими остатками, для целей пылецевого анализа // Проблемы физической географии. 1940. Вып. 8. С. 53–58.
13. *Губин С.В.* Диагенез почв зоны сухих степей, погребенных под искусственными насыпями // Почвоведение. 1984. № 6. С. 5–13.
14. *Демкин В.А.* Палеопочвоведение и археология: интеграция в изучении истории природы и общества. Пушино, 1997. 214 с.
15. *Демкина Т.С., Борисов А.В., Демкин В.А.* Палеопочвы и природная среда северных Ергеней в эпохи энеолита и бронзы (IV–II тыс. до н. э.) // Почвоведение. 2003. № 6. С. 655–669.
16. *Дергачева М.И.* Археологическое почвоведение. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1997. 227 с.
17. *Заварзина Д.Г., Алексеев А.О., Алексеева Т.В.* Роль железоредуцирующих бактерий в формировании магнитных свойств степных почв // Почвоведение. 2003. № 10. С. 1218–1227.
18. *Зданович Г.Б., Иванов И.В., Хабдулина М.К.* Опыт использования в археологии естественных методов исследования (курганы Кара-Оба и Обалы в северном Казахстане) // Советская археология. 1984. № 4. С. 35–48.
19. *Иванов И.В.* Эволюция почв степной зоны в голоцене. М.: Наука, 1992. 144 с.
20. *Иванов И.В., Васильев И.Б.* Человек, природа и почвы Рын-песков Волго-Уральского междуречья в голоцене. М.: Интеллект, 1995. 964 с.
21. *Колесниченко К.Б.* Отчет об археологических раскопках на территории Предгорного района Ставропольского края в 2015 году. Курганный могильник “Винсады-5”. Открытый лист № 783 // Архив ИА РАН. Раздел I. На 01.12.2019 номер не присвоен.
22. *Корневский С.Н.* Общее представление о климатических переменах в равнинном Предкавказье в эпоху начала медно-бронзового века второй половины V–IV тыс до н. э. // Археология и естественные науки в изучении культурного слоя объектов археологического наследия. Мат-лы междисциплинар. научн. конф. М., 2018. С. 89–91.
23. *Лаврушин Ю.А., Спиридонова Е.А., Сулерджицкий Л.Д.* Геолого-палеоэкологические события севера арийской дной зоны в последние 10 тыс. лет // Проблемы древней истории Северного Прикаспия. Самара, 1998. С. 40–65.
24. *Лычагин А.В.* Отчет о раскопках памятников археологии на Кавказских Минеральных Водах, проведенных в 2014 году ГУП “Наследие”. Курган Винсадский 2, курганные могильники Винсады-4, Скачки-3 // Архив ИА РАН. Раздел I. На 01.12.2019 номер не присвоен.
25. *Орлов Д.С., Гришина Л.А.* Практикум по химии гумуса. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1981. 273 с.
26. *Песочина Л.С.* Палеопочвенные исследования курганного могильника “Российский-II” в Ростовской области // Мат-лы Всерос. научн. конф. по археологическому почвоведению, посвященной памяти профессора В.А. Демкина. Пушино, 2014. С. 144–150.

27. Смирнова Л.Г., Чендев Ю.Г., Кухарук Н.С., Нарожная А.Г., Кухарук С.А., Смирнов Г.В. Изменение почвенного покрова в связи с короткопериодическими климатическими колебаниями // Почвоведение. 2019. № 7. С. 773–780. <https://doi.org/10.1134/S0032180X19070116>
28. Спиридонова Е.А., Алешинская А.С., Корневский С.Н., Ростунов В.Л. Сравнительный анализ природной среды времени существования майкопской культуры в Центральном Предкавказье // Материалы по изучению историко-культурного наследия Северного Кавказа. М.: Памятники исторической мысли, 2001. Вып. 2. С. 144–162.
29. Трезуб Т.Ф. К вопросу корреляции палеогеографических событий неоплейстоцена верхнего дона, Среднерусской возвышенности, Беларуси и Центральной Европы // Вестник Воронежского государственного университета. Сер. Геология. 2012. № 1. С. 51–57.
30. Хохлова О.С., Папкина А.Э., Хохлов А.А., Пузанова Т.А., Курбанова Ф.Г. Палеопочвенные исследования курганного могильника Красиковский I в Оренбургской области // Археологические памятники Оренбуржья. Сб. научн. тр. Оренбург, 2019. С. 49–59.
31. Alekseeva T., Alekseev A., Maher B.A., Demkin V. Late Holocene climate reconstructions for the Russian steppe, based on mineralogical and magnetic properties of buried paleosols // Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology. 2007. V. 249. № 1. P. 103–127.
32. Alexandrovskiy A.L., Van der Plicht J., Khokhlova O.S. Abrupt Climatic Change in the Dry Steppe of the Northern Caucasus, Russia, in the Third Millennium BC // Geolines. 2000. V. 11. P. 64–66.
33. IUSS Working Group WRB. World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015. An international soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources. Food and agriculture organization of the United Nations, Rome, 2015. Reports No. 106 (2014).
34. Khokhlova O.S., Voronin K.V., Malashev V.Yu., Golyeva A.A., Khokhlov A.A. Soil evolution and accumulation of loess-like material in the Chechen depression, Northern Caucasus, Russia // Quater. Int. 2001. V. 76–77. P. 103–112.
35. Papkina A., Khokhlova O., Morgunova N., Puzanova T. Evolution of soils of the Southern Urals in the Early Bronze Age on the basis of archaeological data (on an example of a burial ground Krasikovo I in the Orenburg region) // International Multidisciplinary Scientific GeoConference: SGEM: Surveying Geology & Mining Ecology Management, 2018. V. 18. P. 181–188.

## Variations in the Properties of Chernozems and Paleoenvironmental Conditions in the North Caucasus in the 4th Millennium BC according to the Results of the Study of Essentuksky 1 Kurgan

A. E. Sverchkova<sup>1,\*</sup>, O. S. Khokhlova<sup>1</sup>, and A. A. Kalmykov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Physicochemical and Biological Problems of Soil Science, Russian Academy of Sciences, Pushchino, Moscow oblast, 142290 Russia*

<sup>2</sup>*ООО “Heritage”, Stavropol, 355008 Russia*

\*e-mail: [acha3107@gmail.com](mailto:acha3107@gmail.com)

A short-term chronosequence of paleosols buried under different structures in the big Essentuksky 1 kurgan (North Caucasus) constructed in the second quarter of the 4th millennium BC (the Maikop culture) was studied. According to archaeological data, the kurgan construction continued for several decades. During this time, the morphological pattern and physicochemical properties of soils changed: the thickness of the humus profile and the content of organic carbon decreased, the contents of gypsum and carbonates increased and the zone of their accumulation shifted upwards the soil profile, and transformation of the forms of carbonate features took place. The most “arid” properties were found in the soil buried last in the studied chronosequence: the humus horizon of this soil is the lightest in color and has the lowest organic carbon content; the soil profile is most enriched in carbonates, which is manifested both at the macro- and microlevels of observation; the highest content of exchangeable sodium and magnesium is noted in the composition of exchangeable bases; a decrease in the magnetic susceptibility and a maximum in the gypsum content are observed in the second meter of the soil profile. During the construction of the kurgan, Calcic Chernozems (Loamic, Pachic) evolved into Haplic Calcisols (Loamic). A palynological analysis revealed a decrease in the area of forest vegetation and an increase in the share of herbaceous vegetation in the spectrum, including the appearance of steppe species and xerophytes in the region over the studied time. The climate of the studied time interval (the early stage of the Maikop culture in the North Caucasus) was arid and warmer than that at present.

**Keywords:** kurgan structures, short-term chronosequence, morphological and physicochemical properties of soils, palynological analysis, paleoclimatic reconstructions

ГЕНЕЗИС  
И ГЕОГРАФИЯ ПОЧВ

УДК 631.445.53

СОВРЕМЕННЫЙ ГИДРОМОРФИЗМ СОЛОНЦОВ  
ЛЕСОСТЕПНОЙ ЗОНЫ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

© 2020 г. Н. В. Елизаров<sup>а</sup>, \*, В. В. Попов<sup>а</sup>, Н. В. Семендяева<sup>б</sup>

<sup>а</sup>Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, пр-т Академика Лаврентьева, 8/2, Новосибирск, 630090 Россия

<sup>б</sup>Новосибирский государственный аграрный университет, ул. Добролюбова, 160, Новосибирск, 630039 Россия

\*e-mail: elizarov@issa-siberia.ru

Поступила в редакцию 29.11.2019 г.

После доработки 20.04.2020 г.

Принята к публикации 10.05.2020 г.

На территории Западной Сибири остро стоит проблема засоления и осолонцевания почв вследствие подъема уровня залегания минерализованных грунтовых вод выше критической глубины. Цель исследований – изучить современный гидроморфизм солонцов лесостепной зоны Западной Сибири. Динамику уровня почвенно-грунтовых вод изучали в разные по увлажнению годы и в течение вегетационного периода. Для выявления негативных процессов засоления и осолонцевания почвенного профиля под влиянием грунтовых вод проводили сравнение химического состава грунтовых вод с составом солей водной вытяжки почв. Данные получены в ходе многолетних наблюдений за уровнем залегания и химическим составом грунтовых вод в опыте по исследованию длительного действия различных доз гипса на свойства солонцов корковых, заложенных в Новосибирской области. Во время исследований в 2013 г. произошел резкий подъем уровня грунтовых вод, что привело к увеличению минерализации грунтовых вод и запасов солей в профиле солонцов в течение 2015–2016 гг. Зафиксировано увеличение содержания гипотетической соды в профиле солонца. Результаты исследований могут быть использованы для мониторинга состояния почв Западной Сибири, а также необходимы при планировании мелиоративных мероприятий при введении целинных и залежных земель в сельскохозяйственный оборот.

*Ключевые слова:* засоление, осолонцевание, деградация почв, грунтовые воды, Salic Gleyic Solonetz, Sodic soil

DOI: 10.31857/S0032180X20120059

ВВЕДЕНИЕ

В Западной Сибири остро стоит проблема вторичного засоления и осолонцевания почв. Слабая дренированность территории приводит к переувлажнению и засолению сельскохозяйственных угодий. Сложный гривно-равнинный рельеф, близкое залегание и “пульсирующий” характер почвенно-грунтовых вод обусловили мозаичность почвенного покрова. При фоновом гумусово-аккумулятивном дерновом процессе почвообразования повсеместно наблюдается галогенный интразональный. Современный почвенный покров представлен набором разнообразных полугидроморфных и гидроморфных почв. Автоморфные почвы (в основном черноземы обыкновенные) развиваются только на вершинах грив. На склонах широко распространены лугово-черноземные и черноземно-луговые солонцеватые почвы с большим количеством пятен солонцов. В межгривных понижениях и микрозападинах повсеместно встречаются солонцовые и засоленные почвы. Засоленные почвы распространены практически во всех

природно-климатических зонах, но отличаются по генезису и свойствам, что требует различных подходов к их освоению, рациональному использованию и борьбе с засолением [6, 20, 21, 33, 34, 36, 37].

В настоящее время в России деградация плодородных почв происходит вследствие их переувлажнения и вторичного засоления. Особенно широко эти процессы выражены в лесостепной и степной зонах [7, 18, 26]. Орошение почв в условиях близкого залегания минерализованных грунтовых вод без надлежащего дренажа, несоблюдение поливных норм при поливе минерализованными водами приводят к подъему уровня залегания грунтовых вод выше критической глубины [2, 3, 9, 30]. Развитие дорожного, промышленного и складского строительства без проведения необходимых дренажных мероприятий стало причиной перекрытия естественного стока талых вод и застаивания их вдоль дорог и насыпей [12, 15, 24]. Сокращение пашни и увеличение площади ложно-западных лесов также способствовало ухудшению гидрологического режима террито-

рии, подъему уровня минерализованных грунтовых вод и развитию процессов вторичного засоления и осолонцевания мелиорированных и целинных почв.

Кроме того, подъем грунтовых вод на территории Западной Сибири происходит из-за неудовлетворительного состояния мелиоративных осушительных систем [14]. Осушительные каналы, созданные более ста лет назад и открывшие доступ к обширным земельным ресурсам, перестали поддерживаться в надлежащем состоянии. Произошло их заиливание и зарастание, что привело к потере их пропускной способности и возвращению мелиорированных ландшафтов в первоначальное, естественное состояние.

Данные явления характерны для пониженных слабодренированных равнин Западной Сибири, особенно Барабинской низменности.

Среди естественных причин усиления гидроморфизма большую роль играют флуктуации климатических характеристик. В ряде регионов России выявлен тренд увеличения среднегодовых температур и количества атмосферных осадков в зимний период [1, 6, 11, 22, 32, 35]. В южной части Западной Сибири (в границах Томской, Новосибирской и Омской областей) с повышением температуры значительно увеличился влагозапас в снежном покрове, являющейся основным источником питания грунтовых вод Западной Сибири [17, 23].

Широкое распространение явлений переувлажнения на территории России привело к трансформации автоморфных почв степной и лесостепной зон в деградированные гидроморфные. Данные явления наблюдаются в Каменной Степи (Воронежская область), где произошло внутригодовое перераспределение стока со значительным его увеличением в холодное время года, что привело к переувлажнению [16, 27, 29–31]. Подъем грунтовых вод произошел на территории Волго-Донского междуречья, Прикаспийской низменности [19, 28], Русской равнине [13, 19]. В ходе исследований был введен термин “современный гидроморфизм” или “неогидроморфизм” – гидрогенная трансформация структуры, функционирования и компонентного состава ландшафтов [19], а также “мочар” и “мочаризация” – переувлажнение автоморфных почв, в первую очередь черноземов, и последующее их заболачивание [3, 30].

Особую важность приобретают исследования в лесостепной и степной зонах Западной Сибири. Данная территория имеет ряд особенностей, которые способствуют развитию процессов засоления, осолонцевания и осолодения вследствие переувлажнения. Обширные пониженные равнины, занимающие большую часть лесостепной и степной зон, слабо дренированы. Положительные формы рельефа выражены в виде узких грив, ши-

роко распространены многочисленные замкнутые блюдцеобразные понижения суффозионного происхождения. Близко залегающие засоленные палеоген-неогеновые глины представляют собой водоупоры, способствующие аккумуляции влаги.

Промерзание почвы до 1.5–2 м способствует формированию водоупоров для снеготалых вод и застаиванию их в понижениях, через которые происходит инфильтрация в грунтовые воды. Учитывая тенденцию климата Западной Сибири к увеличению зимнего водозапаса, следует ожидать нарастания гидроморфизма территории. В Ишимской степи зафиксирован подъем уровня грунтовых вод за последние 30 лет с 4–7 до 2.5–3 м [9] и переувлажнение автоморфных почв плакоров [10].

Цель исследований – изучить современный гидроморфизм солонцов лесостепной зоны Западной Сибири. В задачи входило: исследовать многолетнюю динамику уровня грунтовых вод; изучить изменение уровня почвенно-грунтовых вод в течение вегетационного периода в разные по увлажненности годы; исследовать минерализацию и химический состав грунтовых вод при различном уровне залегания; зафиксировать изменение уровня грунтовых вод в течение вегетационного периода и в зависимости от положения скважин по рельефу; определить влияние изменяющихся характеристик почвенно-грунтовых вод на солевой состав почв ключевого участка.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Исследуемые процессы протекают в высокодинамичных природных средах, поэтому для выявления механизмов деградации почв необходимо рассматривать систему грунтовая вода–почва в целом. Территория имеет определенную пространственную неоднородность условий почвообразования, поэтому для выявления особенностей процессов деградации почв природных и антропогенно-нарушенных территорий использован сравнительно-географический метод, основанный на катенном анализе организации почвенного покрова и почвенно-геохимической сопряженности.

Детальные исследования проводили в северо-восточной лесостепи Барабинской равнины (Чулымский район Новосибирской области). Экспериментальный участок расположен на плоском межгрядном пространстве (55.080911 N, 81.206495 E; 55.080826 N, 81.206755 E; 55.080748 N, 81.206680 E; 55.080849 N, 81.206406 E). Почвы – солонцы корковые черноземно-луговые высоко-солончаковатые сульфатно-содовые слабо- и средnezасоленные многонатриевые (Salic Gleyic Solonetz).

Район расположения экспериментального участка относится к зоне неустойчивого увлажнения. Климат резко континентальный с продолжительной

холодной зимой (5–5.5 мес.), жарким и коротким летом (3–3.5 мес.). Территория характерна большая амплитуда температур в течение года – разница между среднемесячной температурой самого холодного месяца (январь) и самого теплого (июль) достигает 40°C, а между абсолютными максимумами – 90°C. В зимнее время погода холодная и ясная, ветреная, особенно в январе–феврале. Снег с повышенных элементов рельефа сдувается в понижения, что способствует развитию процессов осолодения и заболачивания. Обнаженная поверхность сильно промерзает и оттаивает лишь к середине мая. Зимой бывают оттепели, особенно в ноябре–декабре. В июле–августе выпадает основное количество осадков, которые часто носят ливневый характер. Среднегодовое количество осадков 350 мм. Коэффициент увлажнения изменяется от 0.8 до 1.2.

Экспериментальный полигон расположен на полого-увалистой равнине с ложинообразными заболоченными понижениями, вытянутыми с северо-востока на юго-запад, в направлении общего уклона. Между заболоченными ложинами располагаются слабоприподнятые широкие пологие гривы, с многочисленными блюдцеобразными понижениями и западинами.

Материнские породы представлены четвертичными озерно-аллювиальными отложениями, повышения – легкими и средними суглинками, склоны – средними суглинками с редкими прослоями песка и супеси.

Микроделяночный опыт по изучению мелиорации солонцов различными дозами гипса заложено под руководством академика В.И. Кирюшина в 1981 г. на ровном участке без выраженного микрорельефа. Исследовали действие гипса в дозах от 0.25 до 1.25 нормы по Гедройцу (5 вариантов и контроль). Размер делянки 4 м<sup>2</sup>, расстояние между делянками 1 м. Повторность в опытах четырехкратная, а расположение делянок – рендомизированное. Весь участок расположен на солонце корковом многонатриевом. Наблюдения за уровнем залегания и солевым составом грунтовых вод проводили во временных скважинах с 1984 до 1994 гг. три раза за вегетационный период (в мае–июне, июле и августе–сентябре) в вариантах с внесением гипса и в контроле. С 1994 г. участок находился под залежью, но перед этим на нем была посеяна смесь люцерны с донником. В 2006 г. исследования по длительному действию гипса в профиле почв были продолжены сотрудниками кафедры почвоведения и агрохимии НГАУ, наблюдения за грунтовыми водами на опытном участке проводили в 2006, 2009, 2013 и с 2015 по 2019 гг.

В почвах всех объектов исследования определяли химизм почвенно-грунтовых вод и катионно-анионного состава водной вытяжки по общепри-

нятым методикам (определение химизма почвенно-грунтовых вод – ГОСТ 26423-85; определение катионно-анионного состава водной вытяжки – ГОСТ 26428-85). Статистическую обработку данных, полученных в результате исследований, выполняли в программе Microsoft Office Excel 2007. При сравнении средних значений данных двух выборок применяли *t*-критерий Стьюдента для уровня достоверности 95%.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

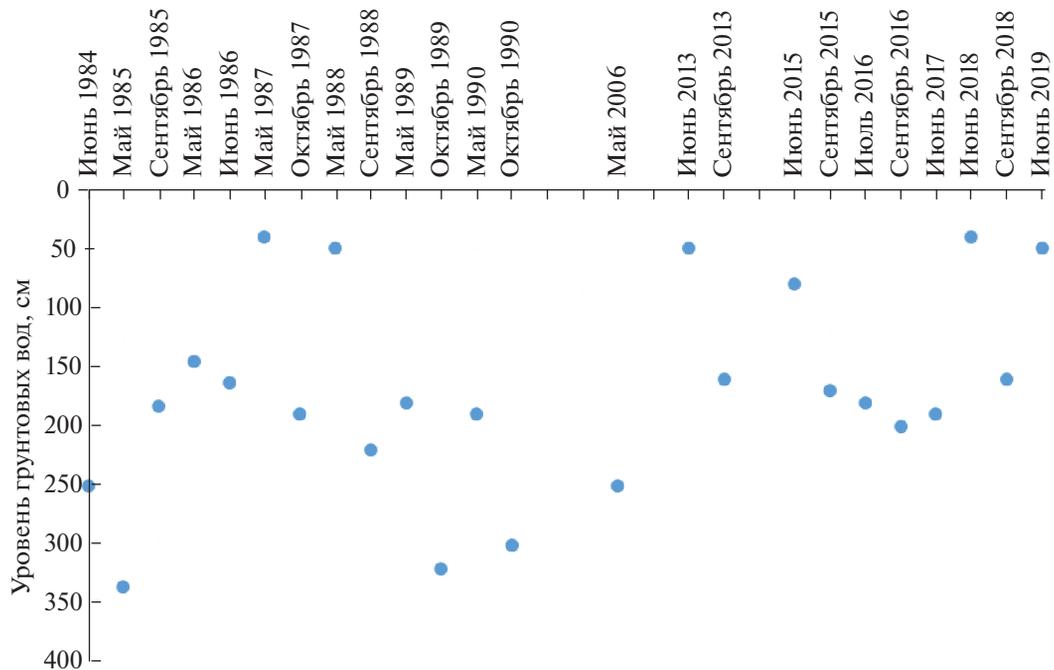
На большей части территории Барабинской низменности почвенно-грунтовые воды залегают ближе 5 м. Пополнение грунтовых вод происходит атмосферными осадками через различные локальные понижения, такие как колючные западины и межгривные понижения, которые являются аккумуляторами стоковых вод. В зимний период формируется устойчивый снежный покров. Запасы воды в снеге к концу зимы небольшие (50–100 мм), однако промерзание почвы до 1.5–2 м способствует формированию водоупоров для снеготалых вод и застыванию их в понижениях, где образуются временные водоемы. Вместе с тальми водами переносятся значительные количества легкорастворимых солей. Водоносные горизонты верхнего гидрогеологического комплекса многоярусны и при этом связаны в местах выклинивания локальных водоупоров, часто образуют один пьезометрический уровень. Равнинный рельеф и горизонтальное залегание отложений создают малые уклоны поверхности грунтовых вод.

Начиная с 1984 г. уровень грунтовых вод (УГВ) изменялся с максимальной глубины 350 см в 1984 г. до 40–50 см в 1987, 1988, 2013, 2018 и 2019 гг. На рис. 1 видно, что изменения уровня залегания грунтовых вод носят циклический характер. После подъема УГВ в 1987 и в 1988 гг. до 50 см, в 1989–1990 гг. УГВ находился на глубине не выше 180–200 см. Похожая ситуация наблюдалась и после второго подъема грунтовых вод до 50 см в 2013 г.

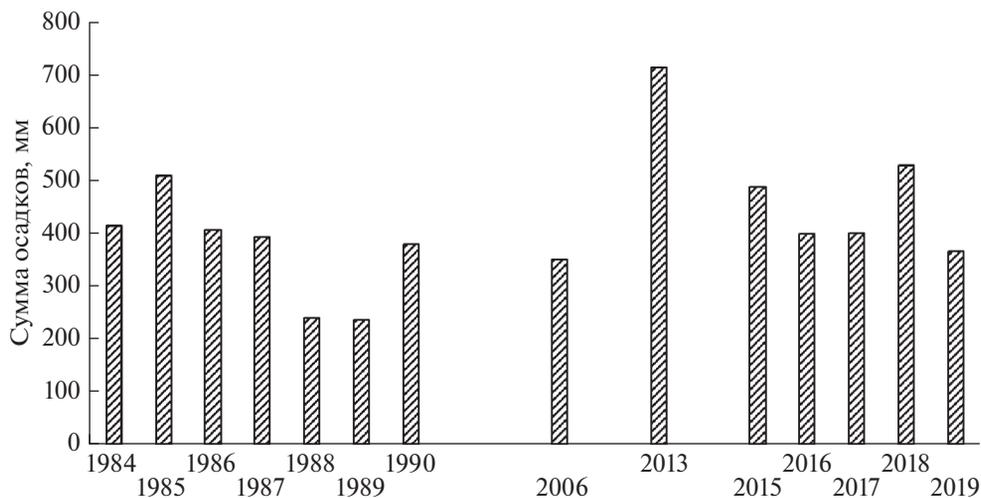
За все время наблюдений УГВ не опускался до уровня 1984 г. (320 см), а нашими исследованиями с 2013 по 2019 гг. не было зафиксировано УГВ ниже 200 см (рис. 1). Пульсация УГВ хорошо видна не только в разные по увлажненности годы, но и от весны к осени. Весной УГВ всегда выше, чем осенью, что связано с питанием весенними тальми водами, через локальные понижения (потускулы).

На рис. 2 видно, что 2013, 2015 и 2018 гг. отличались большим количеством осадков (715, 488, 528 мм соответственно). В эти годы УГВ находился на глубине 40–80 см весной и не опускался ниже 180 см осенью.

Следует отметить, что один и тот же климатический фактор может привести к противоположным результатам в зависимости от других условий



**Рис. 1.** Уровень грунтовых вод на опытном участке с 1984 по 2019 гг. (данные В.Н. Елизарова 1984–1987 гг., Р.Ф. Галева 1987–1990 гг.).

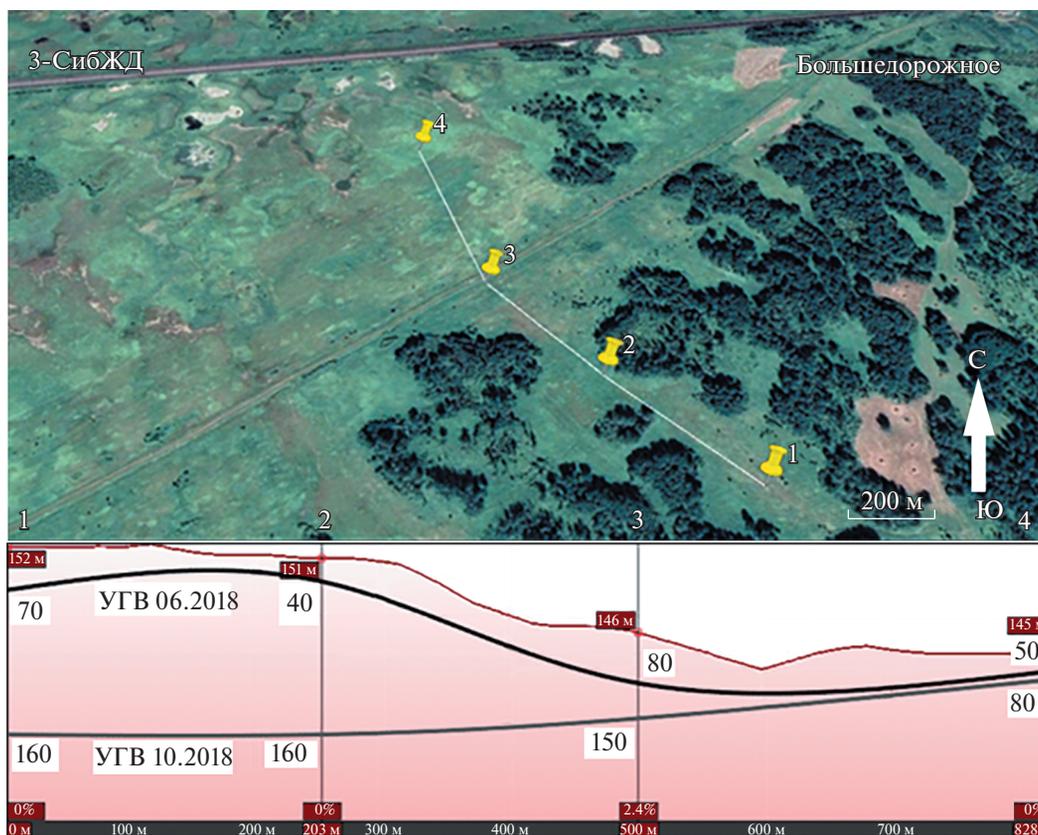


**Рис. 2.** Суммы выпавших осадков в весенне-летний период (с мая по сентябрь) на опытном участке с 1984 по 2019 гг. (данные ГМС “Чулым” ID 29625).

среды и степени своего проявления. Увеличение увлажненности еще не свидетельствует об активизации рассоления почв. Для этого количество осадков должно превышать испарение в теплый период года или следует ожидать засоления почвенного профиля при повышении уровня минерализованных грунтовых вод.

Для детального исследования зависимости УГВ от близлежащей автомобильной и железнодорожной дорог были заложены наблюдательные скважи-

ны 3 (55.082530 N, 81.204237 E) и 4 (55.085364 N, 81.202190 E) (рис. 3), а также скважина 1 (55.079354 N, 81.209517 E) выше по рельефу. В целом УГВ в начале лета 2018 г. повторял рельеф местности. Самое близкое к поверхности залегание грунтовых вод (40 см) зафиксировано в скважине 2 (55.080792 N, 81.206841 E), а самое глубокое – в скважине 3 (80 см), рядом с автомобильной дорогой. Осенью УГВ понизился во всех скважинах, но неравномерно. Максимальная ам-



**Рис. 3.** Почвенно-гидрологический профиль ключевого участка и изменение УГВ от весны к осени 2018 г.: 1, 2, 3, 4 – точки отбора грунтовых вод в 2018 г., скважина 2 находится на экспериментальном участке.

плитуда зафиксирована в скважине 2 (120 см), а минимальная в скважине 4 (30 см), в понижении между железной и автомобильной насыпями. Минерализация грунтовой воды в скважинах была разной.

Во скважине 2, находящейся рядом с опытом по мелиорации солонцов различными дозами гипса, зафиксирована максимальная минерализация (2.2 г/л), тогда как в скважине 4 она была в 2 раза ниже (1.1 г/л). Данное явление объясняется тем, что под воздействием гипса произошло улучшение водно-физических свойств почвы, и легкорастворимые соли из иллювиального горизонта солонца промылись в грунтовые воды. При этом к осени возросла минерализация почвенно-грунтовой воды во всех скважинах в среднем на 0.27 г/л. Следует отметить, что величина минерализации грунтовой воды более стабильна, чем УГВ и более инертна во времени.

При изучении солевого состава грунтовых вод зафиксировано увеличение содержания гидрокарбонат-ионов с 19.0 смоль(экв)/л в 1988 г. до 28.1 смоль(экв)/л в 2018 г. (табл. 1). При этом в июне 2015 г. наблюдалось резкое увеличение концентрации анионов  $\text{HCO}_3^-$  на 13.5 смоль(экв)/л (при стандартном отклонении 5.8), с последую-

щим снижением к осени. Одновременно с резким увеличением содержания гидрокарбонат-ионов зафиксирован рост концентрации ионов натрия с 17.2 до 32.6 смоль(экв)/л (на 15.4 смоль(экв)/л с 2013 по 2015 г. соответственно при стандартном отклонении 5.4). Данное явление мы связываем с резким подъемом УГВ, зафиксированного при предыдущем измерении в 2013 г. Таким образом, прослеживается увеличение минерализации грунтовых вод за счет роста содержания в них, главным образом, содообразующих ионов.

По натриевому адсорбционному отношению (SAR), используемому в зарубежных классификациях по оценке ирригационных вод, грунтовые воды ключевого участка представляют опасность засоления и осолонцевания подпитываемых почв. При увеличении минерализации с 1.7 до 2.6 г/л вырос и показатель SAR с 8 до 18 (табл. 2). Между минерализацией грунтовых вод и SAR прослеживается тесная связь (коэффициент корреляции Пирсона 0.64,  $n = 30$ ), что объясняется содовым засолением грунтовых вод. В основе показателя SAR лежит отношение концентрации одновалентного катиона  $\text{Na}^+$  к сумме двухвалентных  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{Mg}^{2+}$ , что позволяет определить вероятность вхождения  $\text{Na}^+$  в почвенный поглощающий комплекс и

**Таблица 1.** Изменение солевого состава грунтовых вод за период исследований, смоль(экв)/л

Дата	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>
Август, 1988	0.5	19.0	2.7	3.2	1.9	5.2	16.1
Август, 2006	1.4	19.2	1.7	3.0	1.0	4.4	19.9
Июнь, 2013	1.9	20.2	0.6	3.1	0.9	3.4	21.5
Сентябрь, 2013	0.0	21.1	0.6	2.1	0.3	6.3	17.2
Июнь, 2015	3.0	34.6	1.2	0.2	0.9	5.1	32.6
Сентябрь, 2015	0.8	23.2	1.3	2.1	0.8	7.0	19.7
Июнь, 2017	1.5	23.5	0.3	1.3	1.7	6.3	17.4
Июнь, 2018	3.1	21.8	0.3	1.4	1.0	5.5	20.0
Сентябрь, 2018	2.7	28.1	0.7	1.6	0.7	4.3	28.1

Примечание.  $n = 3$ ;  $p = 0.05$ .

**Таблица 2.** Изменение минерализации и натриевого адсорбционного отношения (SAR) грунтовых вод

Параметр	Август, 1988	Август, 2006	Июнь, 2013	Сентябрь, 2013	Июнь, 2015	Сентябрь, 2015	Сентябрь, 2016	Июнь, 2017	Июнь, 2018	Сентябрь, 2018
Минерализация, г/л	1.89	1.75	1.80	1.71	2.75	1.94	2.42	2.59	2.14	2.46
SAR	8	11	13	9	18	10	9	15	11	13

Примечание.  $n = 3$ ;  $p = 0.05$ .

**Таблица 3.** Изменение содержания гипотетической соды в профиле солонца многонатриевого, смоль(экв)/кг

Глубина, см	Сентябрь, 1988	Сентябрь, 2006	Сентябрь, 2009	Май, 2013	Июнь, 2015	Август, 2015	Август, 2016	Август, 2017	HCP <sub>05</sub>	pH, 2016
0–20	1.31	1.08	0.65	0.48	1.10	2.55	2.50	1.73	0.99	9.60
20–40	2.23	2.78	2.40	0.20	1.49	2.97	3.54	2.90	0.99	9.70
40–60	3.21	1.78	2.51	1.35	1.76	2.40	3.23	1.81	0.80	9.70
60–80	2.11	1.40	2.05	2.06	1.49	2.40	2.50	Не опр.	0.69	9.70
80–100	1.13	1.11	1.67	1.20	1.36	1.58	1.54	»	0.62	9.65

Примечание.  $n = 3$ ;  $p = 0.05$ .

развитие в почвах процесса осолонцевания. При этом предельные величины SAR находятся в зависимости от общей минерализации воды, т.е. вероятности развития засоления профиля почв. Поэтому, чем выше минерализация воды, тем более низкими являются критические величины SAR. Исследуемые грунтовые воды при общей минерализации 1.7–2.5 г/л представляют высокую опасность засоления почв [20], поэтому критические значения SAR (при которых появляется очень высокая опасность осолонцевания почв) находятся в пределах 14–18 и более. Таким образом, по натриевому адсорбционному отношению фиксируется высокая вероятность развития солонцового процесса почвообразования на исследуемой территории.

Высокая щелочность (pH 9.6–9.7) и присутствие гидрокарбонатов и карбонатов в количестве 1.3–3.8 смоль(экв)/кг при содержании катионов кальция 0.1–0.3 смоль(экв)/кг в профиле указывает на содовое засоление исследуемых почв. В табл. 3 представлено изменение содержания гипотетической соды в слое 20–40 см солонца многонатриевого с 1988 по 2017 гг. В результате резкого подъема минерализованных грунтовых вод весной 2013 г. зафиксировано перераспределение гидрокарбонатов и карбонатов из верхней части профиля (0–40 см) в слой 60–80 см, поэтому резко снизилось содержание гипотетической соды в слое 20–40 см. В последующих 2015 и 2016 гг. наблюдалось плавное увеличение содержания гипотетической соды в метровом слое почвы. Максимум наблюдался в слое 20–40 см осенью 2016 г.

В катионном составе водной вытяжки преобладал натрий. Содержание как обменного, так и водорастворимого натрия сильно варьируют в разные годы и в течение вегетационного периода [25]. Согласно существующим рекомендациям, принято определять содержание натрия в осенний период, когда количество его достигает максимума. Наши исследованиями зафиксировано, что с мая по сентябрь 2015 г. количество водорастворимого натрия увеличилось в слое 0–20 см с 1.1 до 3.6, а в слое 20–40 см с 1.5 до 3.0 смоль(экв)/кг, т.е. в 2 раза. Увеличение содержания водорастворимого натрия в профиле солонца прослеживается с 2013 по 2016 гг.

Таким образом, после резкого подъема УГВ сначала произошло уменьшение количества гипотетической соды в слое 20–40 см с 2.4 до 0.2 смоль(экв)/кг (2009, 2013 г. соответственно). В последующие 2015–2016 гг. зафиксирован рост содержания гипотетической соды до 3.5 смоль(экв)/кг, то есть величины абсолютного максимума за период наблюдений с 1988 по 2016 гг. Данное обстоятельство указывает на постепенный характер вторичного содового засоления почвенного профиля в течение трех лет после резкого подъема грунтовых вод.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Геоморфологические и климатические условия лесостепной зоны Западной Сибири обусловили широкое распространение засоленных и солонцовых почв. В настоящее время фиксируется повсеместное повышение УГВ. Данное явление связано с тенденцией увеличения количества зимнего влагозапаса, а также с возвращением ранее мелиорированных, но позже выведенных из сельскохозяйственного оборота агроландшафтов в первоначальное, естественное состояние. Кроме того, усугубляет ситуацию ведение хозяйственной деятельности без осуществления необходимых дренажных мероприятий.

Многолетние детальные исследования свидетельствуют об общем повышении УГВ на ключевом участке. Все чаще фиксируется подъем грунтовых вод весной до 40–50 см от поверхности почвы. Грунтовые воды экспериментального участка представляют высокую опасность осолонцевания почв (SAR = 14–18). После резкого подъема УГВ в почвенном профиле проявилось вторичное засоление, которое выразилось увеличением содержания гипотетической соды до величины абсолютного максимума за весь период наблюдений.

Усиление гидроморфизма на территории лесостепной зоны Западной Сибири приводит к вторичному засолению и осолонцеванию почв, ухудшению их физико-химических и химических свойств, что в итоге ведет к снижению плодородия.

Для минимизации данных негативных процессов необходимо восстановить имеющиеся мелиоративные системы, а также не допускать ведение хозяйственной деятельности без осуществления соответствующих дренажных мероприятий.

### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена по государственному заданию ИПА СО РАН при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Булыгина О.Н., Коршунова Н.Н., Разуваев В.Н., Трофименко Л.Т. Анализ изменчивости климата на территории России в последние десятилетия // Тр. ВНИИГМИ-МЦД. 2000. Вып. 167. С. 3–15.
2. Горохова И.Н., Панкова Е.И., Харланов В.А. Изменения мелиоративного состояния орошаемых почв Волгоградской области в XXI веке // Почвоведение. 2019. № 5. С. 595–612. <https://doi.org/10.1134/S0032180X19030067>
3. Зайдельман Ф.Р., Иванов А.Л., Каштанов А.Н. Деградация богарных и орошаемых черноземов под влиянием переувлажнения и их мелиорация. 2012. М.: АПР, 212 с.
4. Зайдельман Ф.Р., Смирнова Л.Ф., Шваров А.П., Никифорова А.С. Практикум по курсу “Мелиорация почв”. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2002. 52 с.
5. Золотокрылин А.Н., Черенкова Е.А. Изменения индикаторов соотношения тепла и влаги, биопродуктивности в зональных равнинных ландшафтах России во второй половине XX в. Известия РАН. Сер. Географическая. 2006. № 3. С. 19–28.
6. Исанова Г.Т., Абудувайли Ц., Мамутов Ж.У., Калдыбаев А.А., Сапаров Г.А., Базарбаева Т.А. Засоленные почвы и определение провинции соленакопления на территории Казахстана // Аридные экосистемы. 2017. Т. 23. № 4. С. 35–43.
7. Кизинек С.В., Белоусов В.С., Тараненко В.В., Шарифуллин Р.С., Володин А.Б. Биомелиорация засоленных почв с помощью сорговых культур в Западном Предкавказье // Рисоводство. 2018. № 1. С. 57–60.
8. Корсак В.В. Проблемы орошения сельскохозяйственных угодий и их засоления в XXI веке // Аграрный научный журнал. 2016. № 8. С. 19–24.
9. Кравицов Ю.В. Основные результаты многолетних почвенно-гидрологических исследований в Ишимской степи // Почвы и окружающая среда. 2018. Т. 1. № 4. С. 284–294.
10. Кравицов Ю.В. Подъем грунтовых вод в Ишимской степи // Сиб. экол. журн. 2009. № 2. С. 217–222.
11. Кузьмина Ж.В. Анализ многолетних метеорологических трендов на юге России и Украины (от лесостепи до пустынь) // Аридные экосистемы. 2007. Т. 13. № 32. С. 47–61.

12. *Майнашева Г.М.* Особенности элементарных почвенных процессов (ЭПП) южных черноземов в условиях антропогенного гидроморфизма // Вестник Моск. гор. пед. ун-та. Естественные науки, 2012. № 2. С. 47–51.
13. *Минаков Р.Н., Ахтырцев А.Б.* Динамика гидроморфного процесса лесостепи Центрально-Черноземного региона // Вестник ВГАУ. Сер. Землеустройство и кадастр. 2011. № 2. С. 151–155.
14. *Нагиев П.Ю., Гумбаталиев М.А., Гейдарова Р.М.* Динамика засоления орошаемых земель на основе аэрокосмических снимков и математическое моделирование процесса засоления почв // Сб. тр. конф. Прорывные научные исследования как двигатель науки нового времени. СПб., 2016. С. 107–111.
15. *Назаренко О.Г., Тюрина И.Г., Магомедов Х.Р.* Почвенные индикаторы гидрогенной трансформации ландшафтов прибрежной зоны Краснодарского водохранилища // Научн. журн. Рос. НИИ проблем мелиорации. 2011. № 4. С. 1–19.
16. *Назаренко О.Г.* Современные процессы развития локальных гидроморфных комплексов в степных агроландшафтах. Автореф. ... докт. биол. наук. М., 2002. 46 с.
17. *Непша А.В., Прохорова Л.А., Завьялова Т.В.* Геоэкологические проблемы орошаемых земель на юге Украины // Актуальные научные исследования в современном мире. 2019. № 1–2. С. 38–43.
18. *Новикова Н.М., Конюшкова М.В., Уланова С.С.* Восстановление растительности на мелиорированных солонцовых почвах Приергенинской равнины (Республика Калмыкия) // Аридные экосистемы. 2018. № 3(76). С. 67–89.
19. *Новикова Н.М., Назаренко О.Г.* Современный гидроморфизм: процессы, формы, проявления, признаки // Аридные экосистемы. 2007. Т. 13. № 33–34. С. 70–82.
20. *Новикова А.В.* Засоленные почвы, их распространение в мире, окультурирование и вопросы экологии. Харьков, 2004. 120 с.
21. *Панкова Е.И.* Засоленные почвы России. М.: ИКЦ “Академкнига”, 2006. 854 с.
22. *Панова М.Л.* Оценка возможного влияния климатических факторов на сельское хозяйство юга Тюменской области // Вестник Тюменского гос. ун-та. 2011. № 4. С. 66–72.
23. *Перемитина Т.О., Яценко И.Г., Днепровская В.П.* Исследование и прогноз тенденций изменения климата Сибирского региона // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2016. Т. 4. № 2. С. 103–107.
24. *Рухович Д.И., Симакова М.С., Куляница А.Л., Брызжев А.В., Калинина Н.В., Королева П.В., Вильчевская Е.В., Долинина Е.А., Рухович С.В.* Влияние лесополос на фрагментацию овражно-балочной сети и образование мочаров // Почвоведение. 2014. № 11. С. 1043–1045.
25. *Семендяева Н.В., Коробова Л.Н., Елизаров Н.В.* Изменение свойств и биологической активности солонцов корковых Барабинской низменности при длительном действии гипса // Почвоведение. 2014. № 11. С. 1325–1331.
26. *Снытко В.А., Собисевич А.В., Шёнфельдер Т.* Вторичное засоление почв как эколого-географическая проблема // Эколого-географические проблемы регионов России. Мат-лы VIII Всерос. науч.-пр. конф. Самара, 2017. С. 225–228.
27. *Титова Т.В., Чевердин Ю.И., Беспалов В.А., Рябцев А.Н., Гармашова Л.В., Рыбакова Н.П., Шеншина Н.А.* Изменение дифференциальной порозности почв Каменной Степи в условиях сезонного переувлажнения // Агрофизика. 2016. № 2. С. 3–15.
28. *Тищенко С.А., Колесников С.И., Горбов С.Н., Воронюк О.В.* Видовой состав и экологическая структура герпетобийотов переувлажненных ландшафтов Ростовской области // Известия Самарского науч. центра РАН. 2016. Т. 18. № 2(2). С. 511–514.
29. *Хитров Н.Б., Назаренко О.Г.* Распространение переувлажненных почв в исходно автоморфных агроландшафтах Ростовской области при ведении системы “сухого” земледелия // Деградация богарных и орошаемых черноземов под влиянием переувлажнения и их мелиорация. М., 2012. С. 125–166.
30. *Хитров Н.Б., Чевердин Ю.И., Чижикова Н.П., Роговнева Л.В.* Почвы Каменной Степи, имеющие признаки слитогенеза (вертигенеза) // Бюл. Почв. ин-та. 2013. Вып. 72. С. 3–25.
31. *Чевердин Ю.И., Титова Т.В., Беспалов В.А.* Особенности формирования гидрологического режима сезонно переувлажненных почв Каменной Степи // Агрохимия. 2019. № 2. С. 60–73. <https://doi.org/10.1134/S0002188119020054>
32. *Cohen J.L., Furtado J.C., Barlow M. et al.* Asymmetric seasonal temperature trends // Geophys. Res. Lett. 2012. V. 39 P. L04705.
33. *Furquim S.A.C., Santos M.A., Vidoca T.T., Balbino M. de A., Cardoso E.L.* Salt-affected soils evolution and fluvial dynamics in the Pantanal wetland, Brazil // Geoderma. 2017. V. 286. P. 139–152. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.10.030>
34. *Juhosa K., Czirányb S., Madarászac B., Ladányid M.* Interpretation of soil quality indicators for land suitability assessment – A multivariate approach for Central European arable soils // Ecological Indicators. 2019. V. 99. P. 261–272. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.11.063>
35. *Kaufmann R.K., Kauppi H., Mann M.L., Stock J.H.* Reconciling anthropogenic climate change with observed temperature 1998–2008 // PNAS. 2011. V. 108. P. 11790–11793.
36. *Meng Q.F., Li D.W., Zhang J.I., Zhou L.R., Ma X.F., Wang H.Y., Wang G.C.* Soil properties and corn (*Zea mays* L.) production under manure application combined with deep tillage management in solonchic soils of songnen plain, northeast China // J. Integrative Agriculture. 2016. V. 15. № 4. P. 879–890. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(15\)61196-0](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(15)61196-0)
37. *Zhang T., Zhan X., He J., Feng H., Kang Y.* Salt characteristics and soluble cations redistribution in an impermeable calcareous saline-sodic soil reclaimed with an improved drip irrigation // Agricultural Water Management. 2018. V. 197. P. 91–99.

## Modern Hydromorphism of Solonetztes in the Forest-Steppe Zone of Western Siberia

N. V. Elizarov<sup>1, \*</sup>, V. V. Popov<sup>1</sup>, and N. V. Semendyaeva<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Soil Science and Agrochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, 630090 Russia*

<sup>2</sup>*Novosibirsk State Agrarian University, Novosibirsk, 630039 Russia*

*\*e-mail: elizarov@issa-siberia.ru*

In Western Siberia, there is an acute problem of soil salinization and alkalization owing to the rise in the level of mineralized groundwater above the critical depth. We studied modern hydromorphism of solonetztes in the forest-steppe zone of Western Siberia. The dynamics of the levels of soil and groundwater were studied in the years with different wetting and during the growing season. To identify the negative processes of soil salinization and solonetzization under the influence of groundwater, the chemical composition of the groundwater was compared with the composition of salts in the soil water extracts. Observations over the level and chemical composition of groundwater were conducted on the plots of the long-term experiment on the effects of different doses of gypsum on the properties of crusty solonetztes in Novosibirsk oblast. During the study, a sharp rise in the groundwater level took place in 2013; it led to an increase in the groundwater salinity and the amount of soluble salts in the profile of solonetz in 2015–2016. An increase in the content of hypothetical soda in the profile of the solonetz was recorded. The results of this study can be used for the purposes of soil monitoring in Western Siberia and for planning land reclamation measures upon the development of virgin land and return of abandoned fields into agricultural use.

*Keywords:* salinization, soil degradation, hydromorphism, groundwater, solonetztes, salt migration, sodium, alkalinity, Western Siberia, Salic Gleyic Solonetz, sodic soil

## ГЕНЕЗИС И ГЕОГРАФИЯ ПОЧВ

УДК 631.4:528.92.94

### АНАЛИЗ ИНФОРМАТИВНОСТИ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ БОЛЬШИХ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ СИСТЕМ ТОЧНОГО ЗЕМЛЕДЕЛИЯ ПРИ КОРРЕКЦИИ КРУПНОМАСШТАБНЫХ ПОЧВЕННЫХ КАРТ

© 2020 г. А. Л. Куляница<sup>а</sup>, Д. И. Рухович<sup>б, \*</sup>, П. В. Королева<sup>б</sup>,  
Е. В. Вильчевская<sup>б</sup>, Н. В. Калинина<sup>б</sup>

<sup>а</sup>ООО “Айти Парма”, Кожевническая ул., 7, стр. 1, Москва, 115114 Россия

<sup>б</sup>Почвенный институт им. В.В. Докучаева, Пыжевский пер., 7, стр. 2, Москва, 119017 Россия

\*e-mail: landmap@yandex.ru

Поступила в редакцию 13.01.2020 г.

После доработки 07.02.2020 г.

Принята к публикации 24.04.2020 г.

Основным источником почвенной информации на пахотные земли России являются крупномасштабные карты ГИПРОЗЕМа. Карты датированы шестидесятыми–девяностыми годами прошлого века. За время, прошедшее с последнего тура обследований, в сельском хозяйстве произошло увеличение точности агротехнических приемов. На настоящий момент архивные почвенные карты нуждаются в коррекции (верификации, актуализации, детализации и унификации). Предложено использовать карты устойчивой внутриполевой неоднородности (УВН) плодородия почв, созданные на основе remote sensing big data. Карты УВН создаются в рамках общей концепции bigdata и ее составляющих big geodata и big agricultural data. Сравнительный анализ архивных почвенных карт с картой УВН на территорию юга России показал большой потенциал карт УВН для почвенной картографии. Обнаружены пропущенные почвенные контуры, уточнены местоположения (актуализация) существующих почвенных контуров, отмечены новые почвенные разности, не отмеченные на архивных картах, составлен план дополнительных почвенных изысканий в рамках концепции data-driven geography. Точность почвенной карты была повышена до состояния применимости в современных системах земледелия, включая точное земледелие. Появился новый источник информации о пространственной неоднородности почвенного покрова и его плодородии.

*Ключевые слова:* внутриполевая неоднородность, большие данные, дистанционное зондирование, точное земледелие

DOI: 10.31857/S0032180X20110088

#### ВВЕДЕНИЕ

Необходимость обновления и коррекции крупномасштабных почвенных карт, созданных ГИПРОЗЕМОм СССР на сельскохозяйственную территорию России, практически бесспорна. Почвенные карты создавались с 1937 по 1996 гг. за 4 тура обследований и охватывали все пахотные земли [27, 35]. Существуют крупномасштабные почвенные карты, созданные ВУЗами, но подавляющее большинство карт созданы именно ГИПРОЗЕМОм. Несколько осложняет работу с ними пространственно-временная неравномерность архива карт ГИПРОЗЕМ. На некоторые территории есть отнесительно новые и совершенные карты последнего тура обследований 90-х годов [16], но есть хозяйства, на которые можно найти только карты 70-х годов [14]. Наибольшая вероятность обнаружить именно карты третьего тура обследований. Карты разных туров обследований могут быть не-

сопоставимы друг с другом по контурной части и идеологии построения [24, 35]. Таким образом, к коррекции и обновлению добавляется очевидная проблема унификации [18, 28, 20, 68]. Общие задачи коррекции архивных крупномасштабных почвенных карт сводятся к их верификации, актуализации, детализации и унификации. Решение этих задач должно повысить ценность традиционной почвенной картографии для современного землеустройства [36] и сельского хозяйства [31].

Поскольку ГИПРОЗЕМ СССР расформирован, а почвенная служба России не создана, то пятый тур обследований является лишь некоторой перспективой. Эту временную лауну можно использовать для разработки новых методов почвенной картографии и создания новой инструкции по почвенным обследованиям. В настоящее время подавляющее большинство почвенных карт создано по инструкции 1973 г. [11].

Кроме устаревания почвенных карт, к негативным изменениям можно отнести снижение доступности для почвовед-картографа и работников сельского хозяйства топографических карт М 1 : 10000 [19]. Эти карты создавались ВИСХАГИ для нужд ГИПРОЗЕМа и имели (имеют) гриф секретности. Топографические карты являлись и являются наилучшей информацией о рельефе местности, то есть основным источником информации для почвовед-картографа [11, 29]. Обновление топографических карт М 1 : 10000 прекращено еще во время третьего тура почвенных обследований. Согласно инструкции 1973 г., почвенное картографирование без информации о рельефе практически невозможно.

К положительным изменениям для почвовед-картографа следует отнести, во-первых, стремительный рост объемов и доступности данных дистанционного зондирования (ДДЗ) [19]. Если при почвенных обследованиях ГИПРОЗЕМа не всегда использовались даже аэрофотоснимки одного единственного срока съемки, то представить современную почвенную картографию без ДДЗ практически невозможно [39, 51, 53, 63]. Во-вторых, практически вся картография перешла на цифровые технологии [46, 52, 60, 61]. Отметим, что весь архив ГИПРОЗЕМа – это карты на бумажном носителе. Сканирование этих материалов не меняет сути и принципов их создания и использования.

Возникает проблема выбора методов совершенствования почвенного картографирования. Практически бесспорно, что нужны методы цифровой почвенной картографии на основе дешифрирования ДДЗ, что должно существенно дополнить возможности традиционной картографии. Большинство методов обработки ДДЗ – это методы нахождения регрессионных зависимостей между спектральными характеристиками кадра ДДЗ и одним из свойств почв [48, 70]. До промышленного применения такие работы дошли только при мощном однофакторном воздействии на почвенный покров, например, засоления почв [17, 39]. Ближе к практическому применению находятся методы определения гумусированности верхней части почвенного профиля (не более 10 см) [61] и измерения влажности почвы с помощью радаров [64]. Остальные регрессионные зависимости по сути не выходят за рамки локальных научных экспериментов. Отметим, что поиском регрессионных зависимостей занимаются более 40 лет.

Альтернативой регрессионным зависимостям спектральных характеристик кадра ДДЗ и почвенных свойств являются технологии big data [44]. Big data шагнули в географию [58, 67] и сельское хозяйство в виде big geo data, big satellite data (remote sensing big data) и big agricultural data [49, 53, 56]. В таком виде их разработали корпорации

Intel [41] и Semanticcommunity [42]. Появилась целая сеть коммерческих структур, которые оказывают массовые услуги по ведению точного цифрового сельского хозяйства на основе big data и big satellite data – ExactFarming [47], FarmersEdge [50], Cropio [45], Агроноут [12], Инттерра [4], AGRO-SAT [38], NEXT farming [65] и др. Результатами алгоритмов обработки big satellite data являются карты внутриполевой неоднородности типа TF (Talking Fields) компании NEXT farming [66], ASF-index компании Агроноут [3, 30], зон неоднородности от компании Инттерра. Еще одним вариантом использования big satellite data является прямое почвенное картографирование на основе технологии спектральной окрестности линии почв [6–8, 21, 22].

Массовое применение на практике технологий big data для нужд сельского хозяйства делает справедливыми вопросы о применимости этих методов для почвенного картографирования и о прямом применении для нужд почвенной картографии результатов анализа big satellite data от коммерческих фирм, которые предоставляют потребителю в виде карт внутриполевой неоднородности и карт заданий для дифференцированного воздействия на сельскохозяйственные угодья. Отметим, что карты задания, как элемент точного земледелия, позволяют поднять урожайность сельскохозяйственных культур на 10–20% без изменения затрат на сельскохозяйственное производство [69].

Первая цель данной работы заключается в оценке информативности карт внутриполевой неоднородности, полученных технологиями big satellite data, для целей коррекции традиционных почвенных карт (верификации, актуализации, детализации и унификации). Второй целью является проверка концепции data-driven geography [56, 62], то есть может ли анализ больших данных задать вектор наземных изысканий, предвосхищая наземные данные.

## ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектами исследования являются:

1. Почвенный покров юга России.
2. Крупномасштабные почвенные карты колхозов, совхозов и административных районов СССР [13–16].
3. Карты внутриполевой неоднородности, полученные анализом big satellite data.

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

**1. Обработка больших спутниковых данных.** Поскольку в работе анализируются карты на основе технологии big data, то можно было бы указать big data как метод работы. Но это не совсем справедливо, так как big data – скорее набор про-

цедур обработки больших объемов информации для применения в разных сферах деятельности. В случае с картами внутриполевой неоднородности big data используется как технология отбора данных для индикационной ботаники. За основу принимается постулат, что состояние растительности в том или ином виде является индикатором плодородия почв. *Под плодородием в точном земледелии понимается потенциальная продуктивность сельскохозяйственных культур, достижимая при существующих технологиях и экономической целесообразности.* Попытки связать конкретную карту состояния растительности на пахотных землях с флуктуациями почвенного плодородия той или иной территории не приводят к успеху. Причины вполне очевидны — неоднородность антропогенного воздействия, которое маскирует природные факторы. На каждом конкретном снимке мы видим не только и не столько влияние плодородия почв на растения, а последствия различных агротехнических приемов, которые могут оказать и оказывают в каждый конкретный момент воздействие на состояние растений, часто превосходящее воздействия природных факторов. Ситуация существенно меняется, если используют весь массив ДДЗ за десятки лет. В этом случае дефекты одного кадра ДДЗ нивелируются другими ДДЗ. Проявление же угнетения растительности в течение десятков лет на одном и том же месте не может не являться проявлением пониженного плодородия. Конечно далеко не все кадры ДДЗ одинаково информативны для построения конечных карт внутриполевой неоднородности. Более того, большинство кадров ДДЗ не пригодны для расчетов и в случае их ошибочного применения могут исказить результат.

За последние десятилетия архивы ДДЗ приняли форму больших данных [53, 59]. Только архивы двух открытых источников Landsat и Sentinel дают от 1200 до более 2000 кадров ДДЗ на каждую точку земной поверхности. Если учесть, что каждый кадр ДДЗ в настоящее время — это совокупность нескольких спектральных каналов, то мы имеем не тысячи, а десятки тысяч спектральных характеристик с пространственным шагом не менее  $30 \times 30$  м. Для отбора информативных кадров можно использовать такие элементы big data, как map-reduce и data mining [72]. По сути это процедуры просеивания данных по заданным информационным параметрам и поэтапное сворачивание данных во все более концентрированный вид. В общем виде цепочка действий по просеиванию ДДЗ имеет вид блок-схемы на рис. 1.

Для реализации блок-схемы задействованы: технология ретроспективного мониторинга почвенно-земельного покрова [2, 23–26], основанная на принципах актуализма и униформизма [9, 54]; процедура атмосферной коррекции [1]; спектральная нормализация ДДЗ на основе математи-

ческого аппарата вычисления линии почв [57] и спектральной окрестности линии почв [6–22]; вычисление вегетационных индексов (ВИ) [40, 43, 55].

**2. Картографический анализ с использованием методов ГИС** применен для сравнения карт внутриполевой неоднородности и традиционных почвенных карт ГИПРОЗЕМА крупного масштаба. Применение метода вполне традиционно и детально описано для данной территории ранее [24].

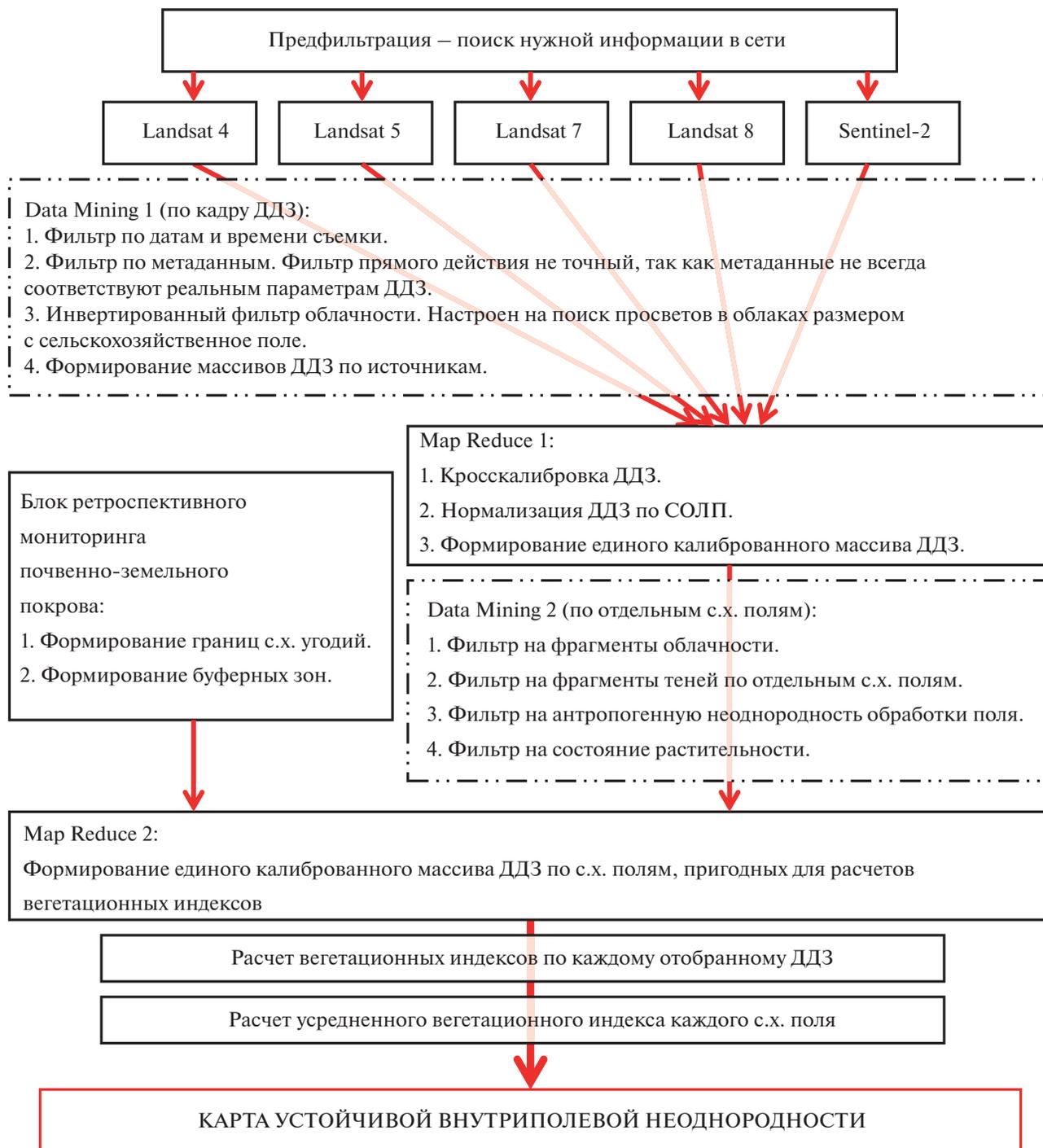
**3. Полевая верификация** в настоящей работе реализована в виде заложения почвенных разрезов для проверки почвенной таксономии контуров почвенных карт и установления таксономической принадлежности объектов карты внутриполевой неоднородности [3, 30, 66], не имеющих отображения на почвенных картах. Закладывалось от двух до семи разрезов на одно сельскохозяйственное поле в зависимости от размера поля и контрастности почвенного покрова. В среднем один разрез закладывался на 20–25 га, что соответствует частоте закладки разрезов для территорий I и II категории сложности [11].

**4. Геореференсация — точная географическая привязка.** Для сравнения почвенных карт и карт внутриполевой неоднородности проведена процедура точной географической привязки архивных почвенных карт. Исправлены искажения бумажных носителей и установлены параметры проекций [32]. На рис. 2, А можно проследить практически полное совпадение лесополос, отображенных на почвенной карте, и границ полей карты внутриполевой неоднородности. На рис. 2, Б лесополосы почвенной карты совпадают с легко дешифрируемыми лесополосами на ДДЗ.

**5. Описание опыта.** В начале 2017 г. проведен ретроспективный мониторинг почвенно-земельного покрова [2, 36] на площади 18350 га (3 хозяйства). Затем на ту же площадь построены карты внутриполевой неоднородности (рис. 3, А) на основе анализа больших спутниковых данных архивов Landsat и Sentinel (проанализировано 1578 кадров ДДЗ на исследуемую территорию с 1984 г.). Карты неоднородности переданы для организации работ по точному земледелию в сентябре 2017 г. до начала посевной озимых культур. В июне–сентябре 2018 г. на нескольких полях комбайнами проведены дифференцированные замеры урожайности различных культур. В августе 2018 г. проведены полевые почвенные изыскания (812 разрезов и 2200 точек агрохимического обследования).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

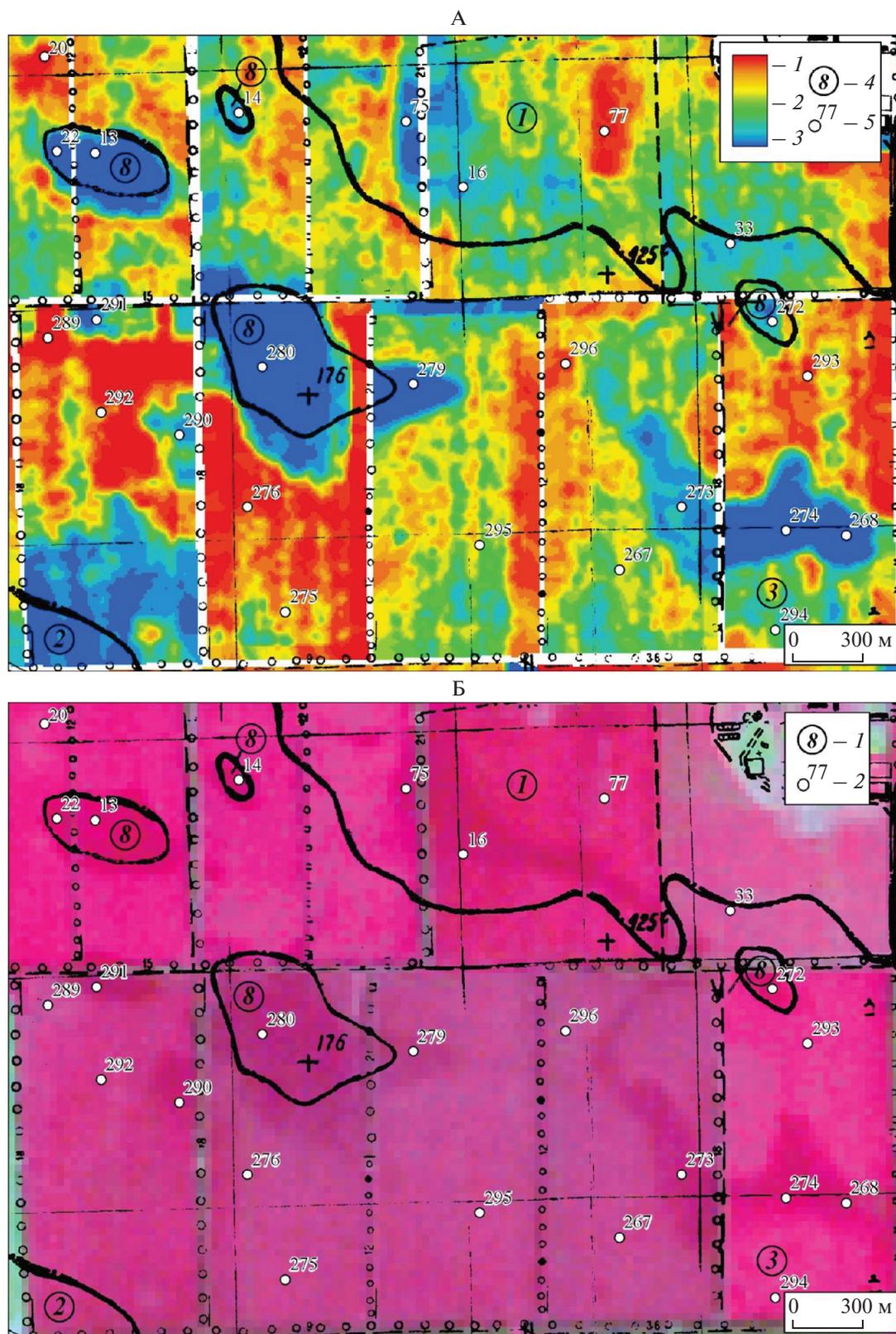
**Агрономическая интерпретация карт внутриполевой неоднородности, полученных анализом больших спутниковых данных.** Как следует из блок-схемы (рис. 1), физически и математически, кар-



**Рис. 1.** Схема обработки больших спутниковых данных для получения карты устойчивой внутриполевой неоднородности плодородия почв.

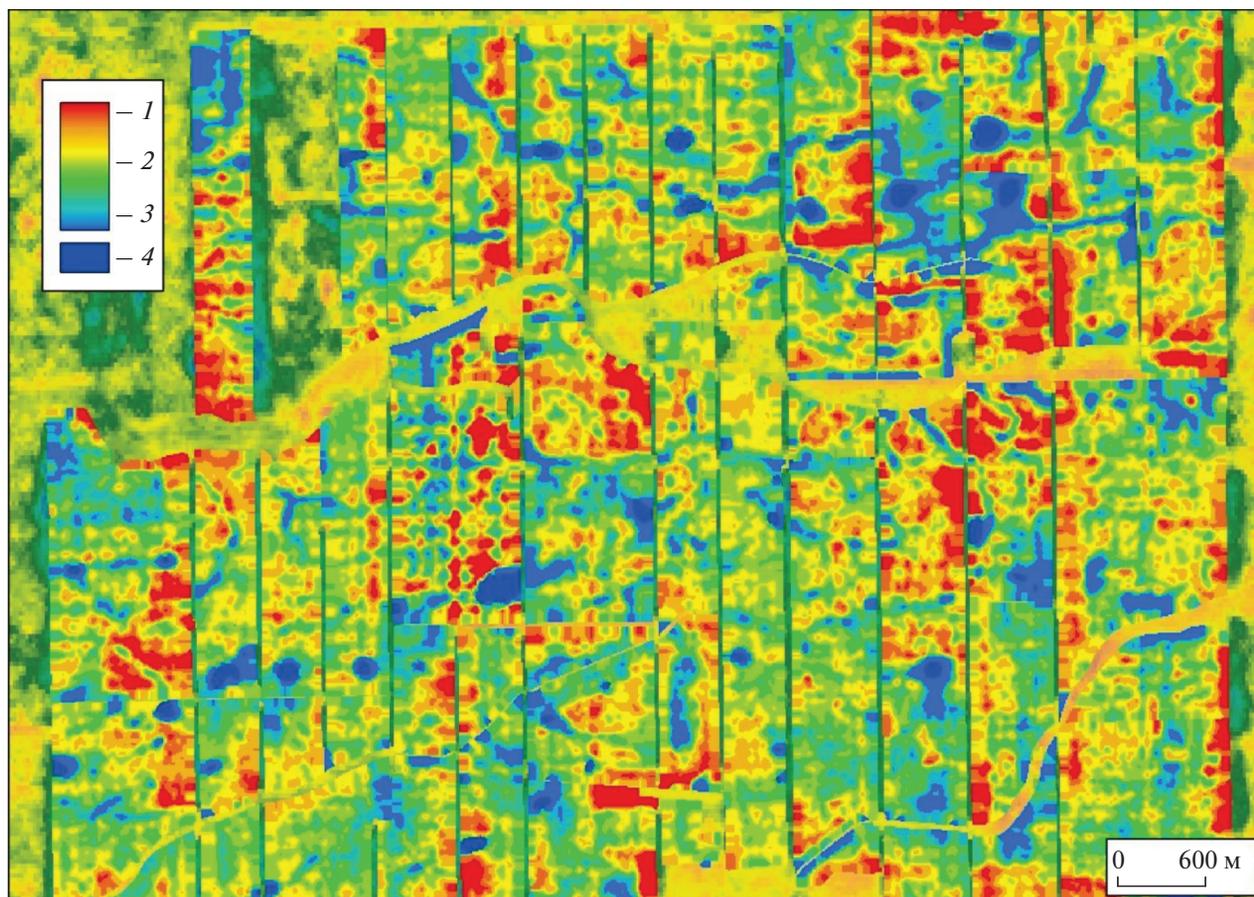
ты внутриполевой неоднородности являются картами среднеголетних спектральных характеристик за 30–35 лет [37]. Поскольку спектральные характеристики введены в расчеты как вегетационные индексы (ВИ), то справедливо назвать эти карты картами среднеголетних значений ВИ. Поскольку ВИ отражают состояние растительности, то карты внутриполевой неоднородности яв-

ляются картами неоднородности состояния культурной (культивируемой) растительности. В свою очередь состояние растительности служит индикатором плодородия почвенного покрова. То есть внутриполевая неоднородность является характеристикой неоднородности плодородия почв. Проявление неоднородности плодородия почв зависит от погодных условий. Усредненное со-

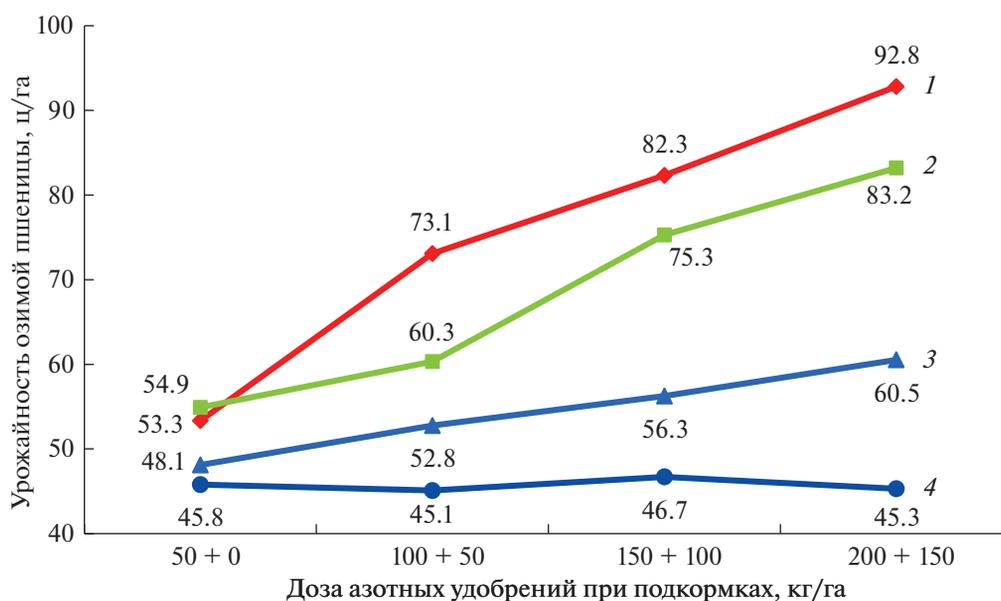


**Рис. 2.** Верификация контуров почвенной карты и зон устойчивой внутриполевой неоднородности плодородия почв (примеры 1 и 2). А – карта зон устойчивой внутриполевой неоднородности плодородия почв с наложенными контурами почвенной карты хозяйства М 1 : 25000 (1 – зона повышенного плодородия, 2 – зона нормального плодородия, 3 – зона пониженного плодородия, 4 – номера почв с почвенной карты (табл. 2), 5 – номера почвенных разрезов (табл. 1, 2)); Б – ДДЗ Landsat 5 1984 г. с наложенными контурами почвенной карты хозяйства М 1 : 25000 (1 – номера почв с почвенной карты (табл. 2), 2 – номера почвенных разрезов (табл. 1, 2)).

А



Б



**Рис. 3.** Карта зон устойчивой внутриполевой неоднородности плодородия почв хозяйства и графики урожайности озимой пшеницы при разных дозах удобрений по зонам плодородия хозяйства. А – фрагмент карты зон устойчивой внутриполевой неоднородности плодородия почв на территорию хозяйства (1 – зона повышенного плодородия, 2 – зона нормального плодородия, 3 – зона пониженного плодородия, 4 – зона очень низкого плодородия); Б – график отзывчивости озимой пшеницы на различные дозы азотных удобрений (аммиачной селитры) по зонам устойчивой внутриполевой неоднородности плодородия почв.

стояние растительности за 30–35 лет нивелирует погодные флуктуации, что позволяет назвать карты внутриполевой неоднородности *картами устойчивой внутриполевой неоднородности плодородия почв*.

На рис. 3, Б даны графики влияния различных доз удобрений на урожайность озимой пшеницы в разных зонах устойчивой внутриполевой неоднородности (УВН). В настоящей работе карты УВН содержат 9–10 зон плодородия. Условно треть зон являются зонами повышенного плодородия, треть — зонами среднего плодородия и треть — зонами пониженного плодородия. Дополнительная зона является зоной очень низкого плодородия и выделяется на сельскохозяйственных землях не всегда. Зона очень низкого плодородия на пахотных землях редко занимает более 15% и как правило, входит в треть зоны пониженного плодородия.

На рис. 3, Б представлены результаты дифференцированного воздействия на сельскохозяйственное поле. Для озимой пшеницы осеннее внесение удобрений проведено единой дозой (не дифференцировано). Дифференцировано проведены весенние подкормки. Для юга России (Ростовская область, Ставропольский и Краснодарский края и т. д.) весенние подкормки озимой пшеницы обычно составляют 100–200 кг/га аммиачной селитры. При этих дозах урожайность по четырем группам зон распределяется как 45.9, 54.5, 67.8 и 77.7 ц/га. То есть действительно зоны карт УВН являются зонами различного плодородия почвенного покрова при существующей типовой агротехнике.

С точки зрения точного земледелия интересна эффективность применения удобрений, так как при соотношении прироста урожайности к дозе внесения удобрений менее 4.2 кг/кг [5, 10], применение удобрений убыточно. График рис. 3, Б демонстрирует разную отзывчивость на удобрения при дозах аммиачной селитры от 50 до 350 кг/га. В зоне повышенного плодородия урожайность меняется от 53.3 до 92.8 ц/га, в то время как в зоне пониженного плодородия только от 48.1 до 60.5 ц/га. В зоне же очень низкого плодородия удобрения вообще не оказывают эффекта. Таким образом карты УВН являются и картами отзывчивости различных частей поля на удобрения. Именно в этой интерпретации карты УВН и применяются в точном земледелии для увеличения эффективности удобрений за счет уменьшения доз удобрений в зонах пониженного плодородия и увеличения доз в зонах повышенного плодородия. Урожайность возрастает на 10–20% без изменений затрат на сельскохозяйственное производство.

Можно считать доказанным что карты средне-многолетней внутриполевой неоднородности ВИ являются именно картами “устойчивой внутриполевой неоднородности плодородия почв” [37, 69].

**Сравнение крупномасштабных почвенных карт и карт устойчивой внутриполевой неоднородности плодородия почв.** На пахотные территории СССР крупномасштабные почвенные карты создавались в М 1 : 10000 и 1 : 25000 в зависимости от оценки однородности почвенного покрова [11, 29]. На исследуемую территорию обнаружены почвенные карты 1975, 1984, 1994 г. трех хозяйств [14–16]. Масштаб 1 : 25000 всех карт говорит об оценке территории как однородной в почвенном плане. При составлении всех трех карт использованы результаты почвенных обследований с 1970 г., то есть обнаружены карты третьего и четвертого туров обследования [35]. Найти две разновременные карты на одну и ту же территорию не удалось. Дробность контуров всех трех карт примерно одинакова. Легенды карт также практически одинаковы [35]. Карта четвертого тура обследования имеет классификационный уклон в сторону увеличения количества почвенных разностей и площадей почв лугового ряда (луговато-черноземных, лугово-черноземных и черноземно-луговых). Эта смена парадигмы описана на примере Тамбовской области [35]. Таким образом на исследуемую территорию мы имеем типичную обеспеченность архивными почвенными картами. Можно сравнить типичные почвенные карты с картами устойчивой внутриполевой неоднородности плодородия почв.

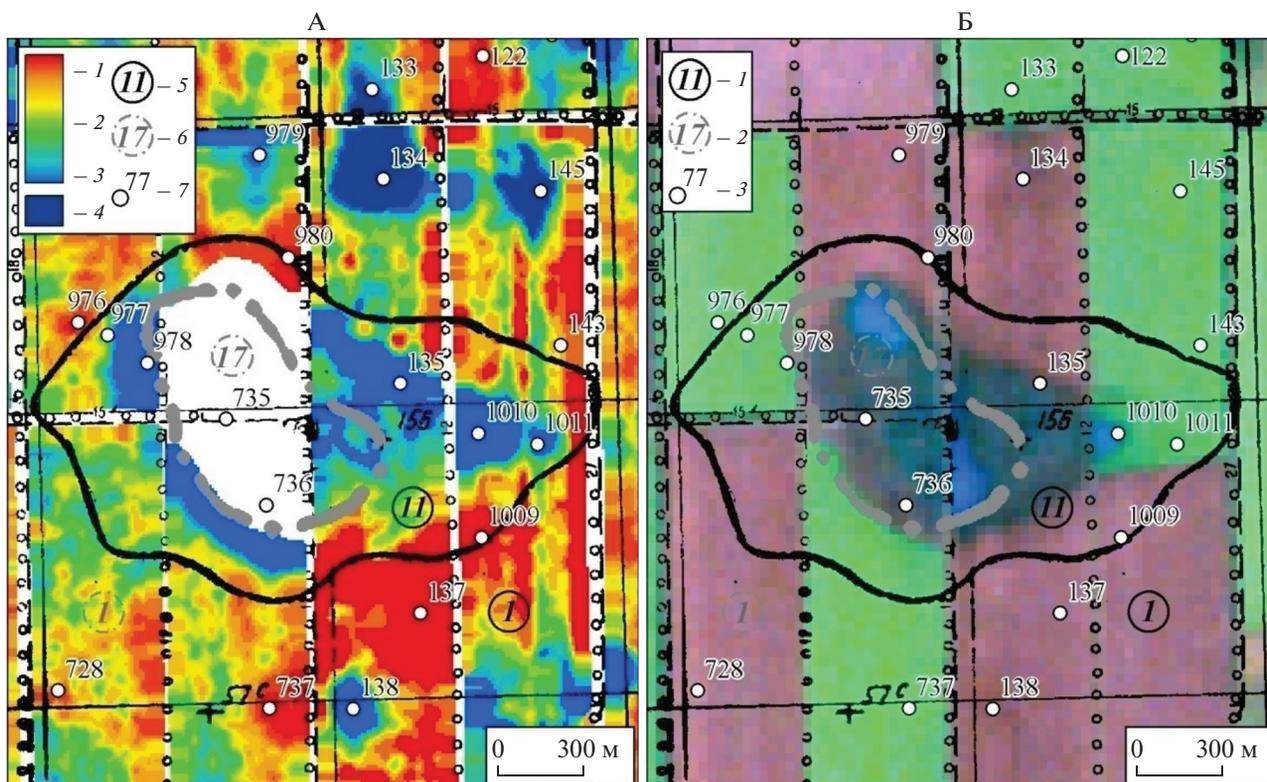
*Пример 1.* Верификация контуров почвенной карты и зон устойчивой внутриполевой неоднородности плодородия почв.

На почвенной карте (рис. 2, А) нанесены 7 почвенных контуров. Три больших контура — это черноземы предкавказские мощные карбонатные малогумусные. Четыре округлых контура — это лугово-черноземные мощные малогумусные почвы. Эти четыре контура соответствуют зонам пониженного плодородия карты УВН. Почвенные разрезы подтверждают приуроченность пониженного плодородия именно к этим почвам (табл. 1, 2).

На рис. 2, А идентифицируются еще четыре контура пониженного плодородия аналогичные по почвенной таксономии, но отсутствующие на почвенной карте (разрезы: 16, 75; 268, 273, 274; 290; 291). Следует установить являются ли эти контуры вновь сформировавшимися или пропущенными при почвенном картографировании. Рассмотрим рис. 2, Б. На этом рисунке почвенные контуры совмещены с ДДЗ 1984 г. На ДДЗ пропущенные контуры дешифрируются. Почвенная карта на эти поля датирована 1984 г. Следовательно контуры на почвенной карте именно пропущены и должны были быть нанесены на момент создания карты.

*Пример 2.* Необходимость актуализации границ почвенной карты по карте УВН плодородия почв.

Контур с разрезом 280 (рис. 2, А) не полностью совпадает с зоной пониженного плодородия.



**Рис. 4.** Верификация контуров почвенной карты и зон устойчивой внутриполевой неоднородности плодородия почв (примеры 2 и 3). А – карта зон устойчивой внутриполевой неоднородности плодородия почв с наложенными контурами почвенной карты хозяйства М 1 : 25000 и почвенной карты района М 1 : 100000 (1 – зона повышенного плодородия, 2 – зона нормального плодородия, 3 – зона пониженного плодородия, 4 – зона очень низкого плодородия, 5 – номера и контуры почв с почвенной карты хозяйства (табл. 2), 6 – номера и контуры почв с почвенной карты района (табл. 2), 7 – номера почвенных разрезов (табл. 1, 2)); Б – ДДЗ Landsat 5 1987 г. с наложенными контурами почвенной карты хозяйства М 1 : 25000 и почвенной карты района М 1 : 100000 (1 – номера и контуры почв с почвенной карты хозяйства (табл. 2), 2 – номера и контуры почв с почвенной карты района (табл. 2), 3 – номера почвенных разрезов (табл. 1, 2)).

Почвенное обследование (разрез 279), подтверждает таксономическую принадлежность недостающей части контура. Следовательно, необходимо актуализировать границы почвенного контура, что подтверждает и ДДЗ на рис. 2, Б. Актуализация границ проводится в сторону увеличения площади контура, характеризующегося пониженным плодородием.

На рис. 4, А аналогичная ситуация, но реальное распространение лугово-черноземных мощных малогумусных почв существенно меньше, чем их отображение на крупномасштабной почвенной карте. Следует отметить расхождение границ почвенного контура на карте хозяйства и карте района (рис. 4, А). На карте района контур лугово-черноземных мощных малогумусных почв проведен по полугоризонтали 95 м и существенно меньше реального распространения переувлажнения (рис. 4, Б). Можно утверждать, что дешифрирование топографических карт может привести к

существенному искажению реальной картины почвенного покрова. Актуализация границ по картам УВН достовернее.

*Пример 3.* Data driven geography (следование за данными) – дополнения легенды к почвенным картам и выделение новых контуров.

Зоны очень низкого плодородия встречаются три раза на рис. 4, А (разрезы 133, 134, 145). Очевидно, что аналогичным почвенным покровом обладает и часть поля, не закрытая картой зон плодородия по причине постоянного отсутствия культурной растительности (разрезы 735, 736). Три области очень низкого плодородия пропущены на почвенных картах, а одна отмечена как лугово-черноземные мощные малогумусные почвы. Разрезы на указанных участках показали, что мы имеем дело со слитизированными почвами, а не просто лугово-черноземными [25, 34]. Отчасти этот факт на почвенных картах отмечался как почвы на гипергенезированных лёссовидных глинах. Слитые поч-

**Таблица 1.** Номера разрезов, номера почв согласно результатам наземной съемки 2018 г., почвенным картам М 1 : 25000, почвенной карте М 1 : 100000 (расшифровку номеров см. в табл. 2)

№ разреза	№ почвы по результатам наземной съемки	№ почвы по картам	
		М 1 : 25000	М 1 : 100000
Рисунок 2			
13	14	8	17
14	14	8	1
16	13	1	1
20	2	3	1
22	14	8	17
33	9	3	1
75	13	1	1
77	1	1	1
267	2	3	1
268	13	3	1
272	13	8	1
273	13	3	1
274	13	3	1
275	2	3	1
276	2	3	1
279	17	3	1
280	17	8	17
289	2	3	1
290	16	3	1
291	13	3	1
292	2	3	1
293	2	3	1
294	5	3	1
295	2	3	1
296	2	3	1
Рисунок 4			
122	1	1	1
133	13	1	1
134	17	1	1
135	16	11	1
137	10	1	1
138	12	1	1
143	10	1	1
145	17	1	1
728	10	1	1
735	18	11	17
736	19	11	17
737	9	1	1
976	1	1	1
977	9	11	1
978	16	11	1
979	12	1	1
980	9	1	1
1009	9	11	1
1010	13	11	1
1011	13	11	1
Рисунок 5			
3	2	3	1
4	6	4	13
6	8	3	13
344	4	3	1
347	5	4	24
348	4	4	1

Таблица 1. Окончание

№ разреза	№ почвы по результатам наземной съемки	№ почвы по картам	
		М 1 : 25000	М 1 : 100000
353	5	6	15
359	15	4	1
360	3	6	13
361	6	6	13
362	5	3	13
363	2	3	1
364	6	6	1
365	3	4	16
366	5	6	1
367	3	4	1
368	3	4	1
369	2	3	1
Рисунок 6			
202	6	4	6
203	6	4	4
209	3	4	4
255	11	4	1
256	5	4	1
257	4	2	1
258	4	2	4
261	3	2	1
262	6	4	4
263	7	4	4
264	6	4	4
462	4	4	4
480	3	4	4
481	6	4	4
483	5	2	1
484	3	2	1
496	6	4	1
497	3	4	1

вы в легендах почвенных карт исследуемого хозяйства отсутствуют. Можно считать подтвержденным, что карта УВН позволяет не только дополнить пропущенные контуры, но и указать места дополнительных почвенных исследований.

*Пример 4.* Следование за данными – актуализация эрозионных контуров, нанесенных в результате дешифрирования топографических карт.

Очень тщательно следует рассмотреть расположение эрозионных контуров почвенных карт. Рис. 5, А демонстрирует, что только часть эрозионных контуров совпадает с реальными зонами пониженного плодородия. Почвенное обследование 2018 г. (табл. 1, 2) подтверждает правильность зон плодородия. На рис. 5, Б становится ясно, что эрозионные контуры нанесены по топографической карте, что соответствует инструкции [11]. Цифровая модель рельефа (ЦМР SRTM [71]) рис. 5, Г подтверждает правильность топографической карты. Космическая съемка высокого разрешения рис. 5, В наоборот подтверждает наличие

эрозии только в зонах пониженного плодородия, как и наземные данные. Можно констатировать, что на данных полях при равной крутизне склонов эрозия проявляется на склонах южной и восточной экспозиций, но отсутствует на склонах северной экспозиции. Таким образом, реальную (фактическую) картину почвенного покрова значительно лучше дает карта УВН, что позволяет актуализировать почвенные карты.

*Пример 5.* Следование за данными – формирование новых границ почвенных контуров.

В приведенных выше примерах, почвенные контуры сформировались до времени составления архивных почвенных карт. На формирование границ почвенных контуров оказывает влияние литология, характеристики рельефа, степень гидроморфизма и другие природные факторы. Появление лесополос, дорог, каналов и других антропогенных элементов ландшафта также оказывает влияние на изменение почвенного покрова [23] в виде формирования новых границ почвенных

Таблица 2. Наименования почв

№	Название почвы (разряд)
По результатам почвенной съемки 2018 г.	
1	Черноземы предкавказские мощные карбонатные малогумусные, глинистые на лёссовидных глинах
2	Черноземы предкавказские мощные карбонатные слабогумусированные глинистые на лёссовидных глинах
3	Черноземы предкавказские среднемощные карбонатные слабогумусированные глинистые на лёссовидных глинах
4	Черноземы предкавказские среднемощные слабосмытые карбонатные слабогумусированные глинистые на лёссовидных глинах
5	Черноземы предкавказские среднемощные среднесмытые карбонатные слабогумусированные глинистые на лёссовидных глинах
6	Черноземы предкавказские среднемощные сильносмытые карбонатные слабогумусированные глинистые на лёссовидных глинах
7	Черноземы предкавказские мощные намытые карбонатные слабогумусированные глинистые на лёссовидных глинах
8	Черноземы предкавказские солончаковые среднемощные слабогумусированные глинистые на лёссовидных глинах
9	Луговато-черноземные почвы мощные карбонатные малогумусные, глинистые на лёссовидных глинах
10	Луговато-черноземные почвы мощные карбонатные малогумусные уплотненные, глинистые на лёссовидных глинах
11	Луговато-черноземные почвы мощные намытые карбонатные малогумусные, глинистые на лёссовидных глинах
12	Лугово-черноземные почвы мощные карбонатные малогумусные, глинистые на лёссовидных глинах
13	Лугово-черноземные почвы мощные карбонатные малогумусные уплотненные, глинистые на лёссовидных глинах
14	Лугово-черноземные почвы мощные малогумусные глубоко слитизированные, глинистые на видоизмененных лёссовидных глинах
15	Лугово-черноземные почвы мощные намытые карбонатные малогумусные, глинистые на лёссовидных глинах
16	Черноземно-луговые почвы мощные карбонатные малогумусные уплотненные, глинистые на лёссовидных глинах
17	Черноземно-луговые почвы мощные малогумусные глубокослитизированные, глинистые на видоизмененных лёссовидных глинах
18	Черноземно-влажно луговые почвы мощные малогумусные глубокослитизированные, глинистые на видоизмененных лёссовидных глинах
19	Луговые почвы мощные малогумусные глубокослитизированные, глинистые на видоизмененных лёссовидных глинах
По почвенным картам хозяйств масштаба 1 : 25000	
1	Черноземы предкавказские мощные карбонатные малогумусные, глинистые на лёссовидных глинах
2	Сочетание черноземов предкавказских мощных карбонатных малогумусных (75–90%) с черноземами предкавказскими среднемощными слабосмытыми карбонатными слабогумусированными (10–25%), глинистые на лёссовидных глинах
3	Черноземы предкавказские мощные слабодефлированные карбонатные слабогумусированные глинистые на лёссовидных глинах
4	Черноземы предкавказские среднемощные слабосмытые карбонатные слабогумусированные местами малогумусные глинистые на лёссовидных глинах, местами желто-бурых
6	Черноземы предкавказские среднемощные среднесмытые карбонатные слабогумусированные глинистые и тяжелосуглинистые на лёссовидных глинах и суглинках
8	Лугово-черноземные почвы мощные малогумусные, глинистые на гипергенизированных лёссовидных глинах
11	Луговые почвы мощные малогумусные местами слабогумусированные глинистые на гипергенизированных лёссовидных глинах

Таблица 2. Окончание

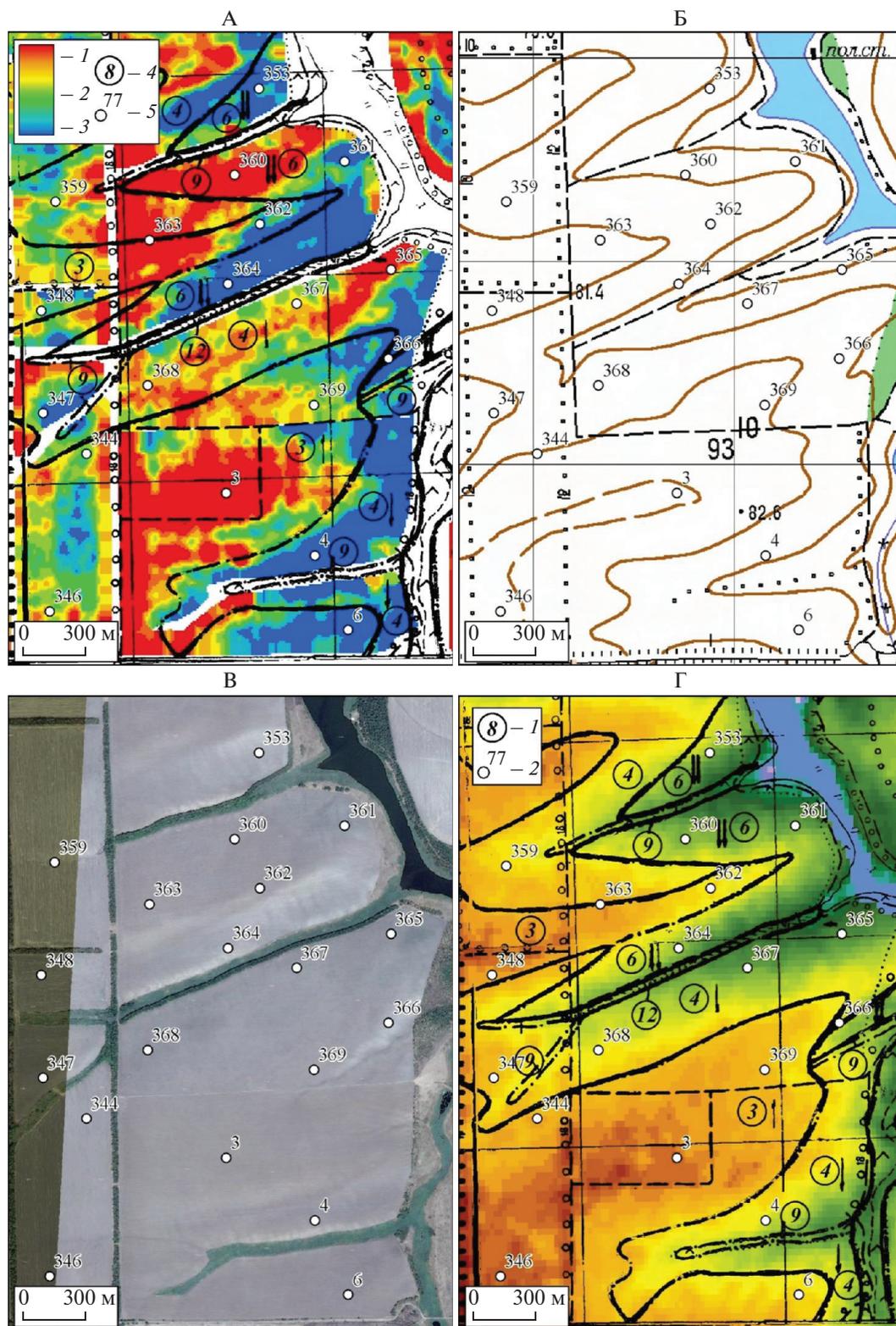
№	Название почвы (разряд)
По районной почвенной карте масштаба 1 : 100000	
1	Черноземы предкавказские мощные карбонатные, глинистые и тяжелосуглинистые на лёссовидных глинах и суглинках
4	Сочетание черноземов предкавказских мощных карбонатных (75–50%) с черноземами предкавказскими мощными слабосмытыми карбонатными (25–50%), глинистые и тяжелосуглинистые на лёссовидных суглинках и глинах
6	Черноземы предкавказские мощные слабосмытые карбонатные, глинистые и тяжелосуглинистые на лёссовидных глинах и суглинках
13	Черноземы предкавказские среднемощные слабосмытые карбонатные, глинистые, местами тяжело- и среднесуглинистые на лёссовидных глинах и суглинках, местами на скифских глинах и суглинках слабо-щебенчатых
15	Черноземы предкавказские среднемощные среднесмытые карбонатные, глинистые, местами тяжелосуглинистые на лёссовидных глинах и суглинках, иногда на слабохрящеватых скифских глинах
16	Черноземы предкавказские маломощные сильносмытые карбонатные, глинистые, местами тяжелосуглинистые на лёссовидных глинах, иногда на слабощебенчатых скифских глинах и суглинках
17	Лугово-черноземные почвы поверхностного увлажнения, глинистые и тяжелосуглинистые на лёссовидных глинах и суглинках подстилаемые скифскими глинами
24	Почвы балок: по склонам смытые, по днищам дерново-намытые, местами лугово-черноземные и лугово-болотные, глинистые, местами тяжело- и среднесуглинистые на лёссовидных скифских и делювиальных глинах и суглинках

контуров. На рис. 2, А вокруг разреза 290 расположен гидроморфный почвенный контур. Его особенностью является четкая восточная граница, совпадающая с границей поля. Для традиционных почвенных карт совершенно не характерно совпадение границ контуров с границами полей. Рассмотрим явление детальнее.

На снимке 1984 г. (рис. 2, Б) можно проследить исходную конфигурацию гидроморфного контура (разрез 290). Контур имел овальную форму, располагался на территории двух полей в направлении от разреза 290 к разрезу 276. Но основная часть водосборного бассейна гидроморфного контура (разрез 290) находится на поле с разрезами 289–291. Соседнее поле является водосбором для гидроморфного контура с разрезом 280. Появление лесополосы и дороги создало локальный барьер, разрезавший единый контур. Для западной части контура (разрез 290) степень гидроморфизма увеличилась. Для восточной части снизилась. Избыток влаги, ранее распространявшейся на два поля, увеличил площадь гидроморфизма на западном поле вдоль лесополосы. Границей новой области распространения переувлажнения стала как бы граница самого поля. На восточном поле область гидроморфизма исчезла. В виде карты УВН наблюдается новая, сформированная антропогенным влиянием, картина распространения факторов почвообразования. В этой картине появляются линейные границы внутриверховной неоднородности, ранее не характерные для почвенной картографии.

*Пример 6.* Детализация почвенных карт и структура почвенного покрова.

Детальность почвенных карт вопрос сложный. На почвенных картах М 1 : 25000 встречаются контуры с шириной в 40–50 м. Обычно это контуры унаследованные от схем внутрихозяйственного землеустройства, где эти контуры не являются пашней (рис. 6) (цифра 9 в кружочках на архивных почвенных картах). На исследуемых территориях почвенные контуры имеют ширину в 60 м, в местах с сильно выраженным негативным фактором (засоление почв, утрата гумусового горизонта и т. п.). Обычно почвенные контуры имеют ширину на карте более 4 мм или более 100 м на местности в М 1 : 25000. Для компенсации размера контура на карте может быть указана формула контура из нескольких почвенных наименований (основная и сопутствующие почвы), что соответствует учению о структуре почвенного покрова [33]. На картах хозяйств данного исследования структура почвенного покрова не указывалась. Так, на рис. 6 мы видим 3 больших почвенных контура, различающихся между собой по степени эрозии (не эродированные и слабо эродированные почвы). Реальная картина значительно сложнее. Здесь мы имеем сложную структуру почвенного покрова с сочетанием всех степеней эродированности от полной утраты горизонтов А и АВ (разрезы 262, 264), где пахотным является горизонт В, до черноземов с гумусовым горизонтом более 70 см (разрез 209). Кроме зональных и эродированных почв, широко представлены лугово-черноземные и черноземно-луговые почвы. Ши-



**Рис. 5.** Верификация эрозионных контуров почвенной карты и зон устойчивой внутриполевой неоднородности плодородия почв (пример 4). А – карта зон устойчивой внутриполевой неоднородности плодородия почв с наложенными контурами почвенной карты хозяйства М 1 : 25000 (1 – зона повышенного плодородия, 2 – зона нормального плодородия, 3 – зона пониженного плодородия, 4 – номера почв с почвенной карты (табл. 2), 5 – номера почвенных разрезов (табл. 1, 2)); Б – топографическая карта с нанесенными номерами почвенных разрезов; В – ДДЗ высокого разрешения 2014 г. с нанесенными номерами почвенных разрезов; Г – ЦМР с наложенными контурами почвенной карты хозяйства М 1 : 25000 (1 – номера почв с почвенной карты (табл. 2), 2 – номера почвенных разрезов (табл. 1, 2)).

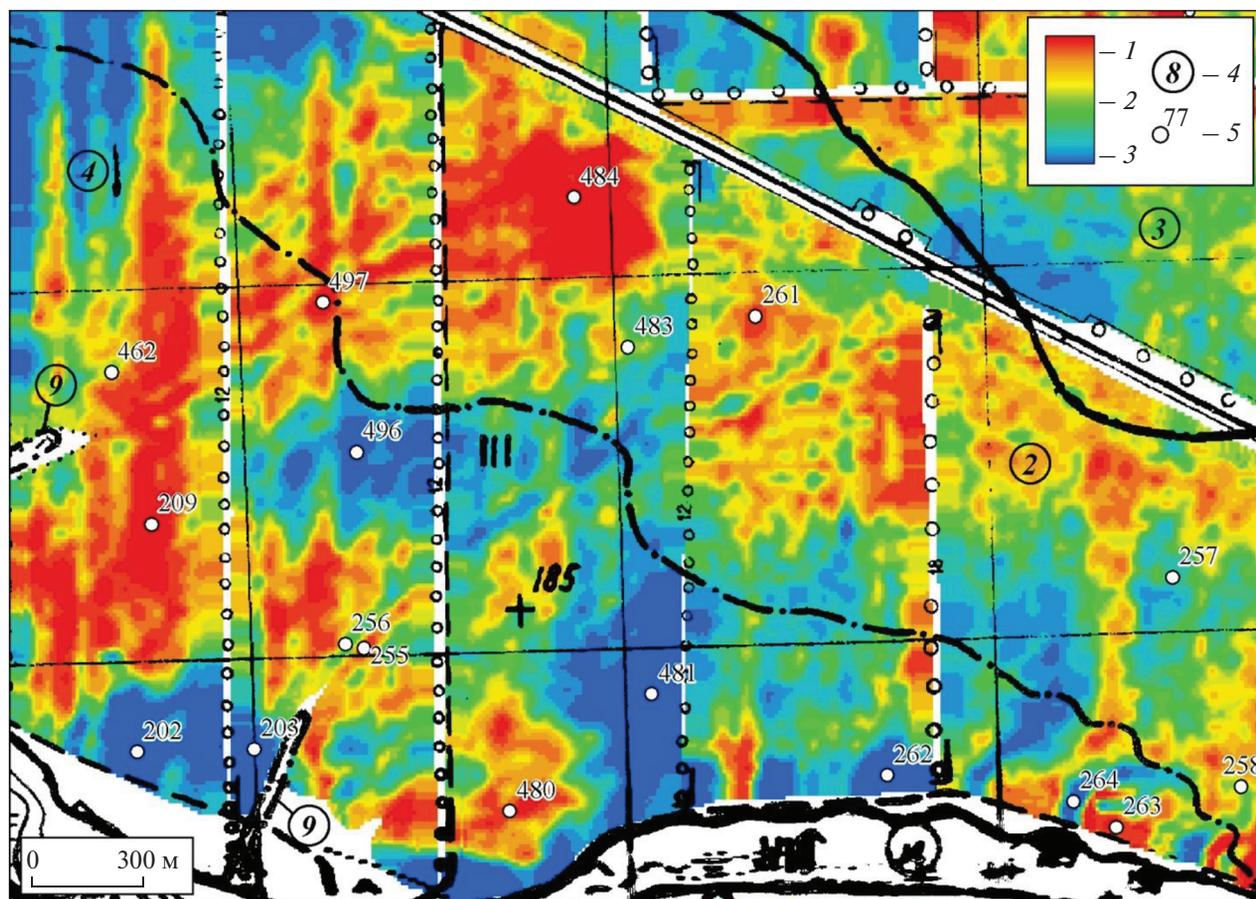


Рис. 6. Детализация почвенных карт и структура почвенного покрова. Карта зон устойчивой внутриполевой неоднородности плодородия почв с наложенными контурами почвенной карты хозяйства М 1 : 25000 (1 – зона повышенного плодородия, 2 – зона нормального плодородия, 3 – зона пониженного плодородия, 4 – номера почв с почвенной карты (табл. 2), 5 – номера почвенных разрезов (табл. 1, 2)).

рина зон плодородия составляет 20, 30 и 40 м. Такие поперечные размеры контуров характерны для М 1 : 10000, где они составят от 2 до 4 мм на карте.

Для систем точного земледелия предпочтительна детализация почвенных карт до М 1 : 10000 на основе карт УВН. Для традиционного почвоведения при сохранении М 1 : 25000, необходимо перейти к фиксации структуры почвенного покрова также на основе карт УВН. Дешифрирование топографических карт для данной местности нужно считать недостаточным. Чисто технически, карты УВН на основе Sentinel 1–2 могут иметь пространственное разрешение 10 м, что позволяет довести детализацию почвенных карт до М 1 : 5000.

**Оценка возможностей карт устойчивой внутриполевой неоднородности плодородия почв для коррекции почвенных карт хозяйств юга России М 1 : 25000.** На исследуемую территорию зафиксировано около 115 почвенных контуров и 24 выдела в легенде на уровне разряда на почвенных картах. Примерно половина почвенных контуров приходится на пахотные земли (65 контуров). Сравне-

ние с картами УВН показывает, что на почвенных картах на пахотных угодьях пропущено более половины (две трети) контуров, оказывающих существенное влияние на урожайность сельскохозяйственных культур. Часть этих контуров может быть идентифицирована в рамках существующих легенд. Часть требует для идентификации расширения почвенной легенды включением почв слитизированных и антропогенно уплотненных. От трети до половины существующих почвенных контуров на пахотных угодьях нуждаются в актуализации границ.

Карты УВН позволяют как усовершенствовать традиционные почвенные карты с сохранением М 1 : 25000, так и поднять детализацию почвенных карт до М 1 : 10000.

Отсутствие контуров с участками почвенного покрова, которые оказывают влияние на продуктивность сельскохозяйственных земель, фиксируется и на почвенных картах М 1 : 10000 последнего тура обследований [24]. Количество пропущенных контуров сопоставимо с М 1 : 25000.

### О возможности унификации крупномасштабного почвенного картографирования на основе карт УВН.

Традиционное почвенное картографирование в значительной мере зависит от квалификации почвовед-картографа, доступных материалов и тщательности проведения работ. Кроме того, на картографирование оказывает влияние текущая концепция почвенной картографии, которую реализует почвовед-картограф. Как было показано на примере развития крупномасштабной почвенной картографии Тамбовской области [35], почвенные карты, выполненные в одном масштабе, но в разных концепциях, различаются как по легендам, так и по контурам. Карты УВН не могут разрешить проблему смены парадигм в почвенной таксономии, но могут унифицировать процесс выделения границ почвенных контуров. Выделение зон различного плодородия карт УВН происходит на основе алгоритма, который не зависит от оператора. Работа алгоритма также не связана с наземными калибровками. Точность карт УВН зависит только от наличия необходимого количества ДДЗ. Как результат, все части земельного покрова единообразно классифицируются по уровню плодородия. Плотность контуров унифицируется, так как зависит только от контрастности плодородия частей поля.

**Недостатки карт УВН.** Основным недостатком карт УВН является невозможность указания почвенной номенклатуры выделяемых пространственных объектов. Карта УВН строится в непрерывной числовой шкале от почв с низким плодородием до почв с высоким плодородием. Карта УВН не указывает на причины такого разделения. В настоящем исследовании причинами были: переувлажнение, эрозия, переуплотнение, слитизация, иссушение, почвообразующие породы и т. д. Но эти причины были выявлены экспертно в ходе анализа слоев ГИС [50, 60] и подтверждены наземными методами. Присвоение выделенным объектам наименований почв возможно на основе камерального дешифрирования, наземного обследования и анализа архивных почвенных карт.

Вторым недостатком карт устойчивой внутриполевой неоднородности плодородия почв является низкая чувствительность метода в случае одинаковости плодородия у разных почвенных выделов, граничащих друг с другом. В настоящем исследовании сложно привести однозначный пример равенства плодородия разных почв. Сложным оказалось подтвердить или опровергнуть разделение почв слабой степени дефляции и почв с отсутствующей дефляцией. Возможно, существуют регионы, где этот процесс будет проявляться более ярко.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В распоряжении почвоведов-картографов появился принципиально новый источник информации о пространственной неоднородности почвенного покрова — карта устойчивой внутриполевой неоднородности плодородия почв, полученная на основе технологий big satellite data. Карта обладает следующими функциональными возможностями для крупномасштабной почвенной картографии:

1. Позволяет детализировать традиционные почвенные карты до М 1 : 25 000, 1 : 10 000 и 1 : 5 000 по выбору картографа.

2. Предлагает более точные (актуализированные) границы почвенных контуров по сравнению с традиционным дешифрированием топографических карт, гипсометрии, цифровых моделей рельефа и отдельных ДДЗ [11, 29]. Важно, что границы почвенных контуров при использовании зон плодородия не являются результатом дешифрирования, а лишь отображением реальных (актуальных) различий в почвенном плодородии в пределах каждого поля в течение десятков лет.

3. Радикально меняет подход к картографированию эрозии почв, так как хорошо дифференцирует склоны одинаковой крутизны по фактической величине деградации. Следует отметить, что фиксируется разное проявление эрозии при разной экспозиции склонов. Позволяет перейти от картографирования склона по степени эрозии к фиксации сложных эрозионных комплексов из смытых, намытых и луговых почв в пределах одного склона.

4. Показывает наличие почвенных контуров в местах их отсутствия на почвенных картах, включая контуры требующие расширения почвенной таксономии (легенд) традиционных карт.

5. Предсказывает наличие почвенных контуров при их невыраженности на топографических картах, отдельных ДДЗ и ЦМР.

6. Задаёт новый вектор почвенных исследований, фиксируя неоднородности почвенного пространства там, где традиционное почвоведение предполагает лишь одну почвенную разность.

Использование карт устойчивой внутриполевой неоднородности плодородия почв позволяет решить комплекс задач по коррекции архивных почвенных карт в виде верификации, актуализации, детализации и унификации почвенной информации. Кроме того, эти карты задают новый вектор почвенных исследований, то есть реализуют для почвоведения концепцию следования за данными — data-driven geography.

Главное преимущество использования нового источника информации заключается в возможности более полного раскрытия потенциала почвенной картографии в отображении важнейшей характеристики почвенного покрова — плодородия.

дия почв. Почвенные карты, легко интерпретируемые в форме отзывчивости на агротехнические и агрохимические приемы, широко востребованы в современном сельском хозяйстве в отличие от традиционных почвенных карт.

В виде карт устойчивой внутриполевой неоднородности плодородия почв в почвоведение пришли несколько элементов технологии big data в виде big satellite data и data-driven geography. Потенциал информативности новых методов значительно больше аспектов, затронутых в данной статье, и нуждается в дальнейших исследованиях.

### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-07-00872).

### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анализ и подготовка данных ДЗЗ из открытых источников для систем точного земледелия // <https://gisinfo.ru/item/120.htm>
2. Брызжев А.В., Рухович Д.И., Королева П.В., Калинина Н.В., Вильчевская Е.В., Долинина Е.А., Рухович С.В. Организация ретроспективного мониторинга почвенного покрова и земель Азовского района Ростовской области // Почвоведение. 2013. № 11. С. 1294–1315.
3. Дневник агронома. 2018. // <https://www.avgust.com/newspaper/topics/detail.php?ID=6860>
4. Интterra: инновационные решения для сельского хозяйства // <https://intterra.ru/ru>
5. Калькулятор удобрений. ЕвроХим-Новомосковск // <https://eurochem-nakazot.ru/calculator/index.html>
6. Королева П.В., Рухович Д.И., Рухович А.Д., Рухович Д.Д., Куляница А.Л., Трубников А.В., Калинина Н.В., Симакова М.С. Местоположение открытой поверхности почвы и линии почвы в спектральном пространстве RED-NIR // Почвоведение. 2017. № 12. С. 1435–1446.
7. Королева П.В., Рухович Д.И., Рухович А.Д., Рухович Д.Д., Куляница А.Л., Трубников А.В., Калинина Н.В., Симакова М.С. Характеристика почвенных типов и подтипов в N-мерном пространстве коэффициентов мультитременной (эмпирической) линии почв // Почвоведение. 2018. № 9. С. 1085–1098.
8. Куляница А.Л., Рухович А.Д., Рухович Д.Д., Королева П.В., Рухович Д.И., Симакова М.С. Применение кусочно-линейной аппроксимации спектральной окрестности линии почв для анализа качества нормализации материалов дистанционного зондирования // Почвоведение. 2017. № 4. С. 401–410.
9. Лайель Ч. Основания геологии или переменны, происходившие некогда с землею и с ее обитателями / Пер. с 5-го изд.: В 2 т. М.: Тип. Э. Барфкнехта и Ко, 1859: Т. 1. 96 с.; Т. 2. 96–177 с.
10. Носов В.В. Экономическая оценка применения минеральных удобрений в России в современных условиях. Семинар для коммерческой службы ООО “ФосАгро-Регион”, г. Балаково, 20 мая 2015 г. // [http://eeca-ru.ipni.net/ipniweb/region/eecaru.nsf/0/5187B34B53F5AD2E43257E510027CF05/\\$FILE/Economic%20assessment%20of%20fertilizer%20use%20in%20Russia\\_RUS.pdf](http://eeca-ru.ipni.net/ipniweb/region/eecaru.nsf/0/5187B34B53F5AD2E43257E510027CF05/$FILE/Economic%20assessment%20of%20fertilizer%20use%20in%20Russia_RUS.pdf)
11. Общесоюзная инструкция по почвенным обследованиям и составлению крупномасштабных почвенных карт землепользования. М.: Колос, 1973. 95 с.
12. ООО “Агроноут” / Skolkovo Community // <http://sk.ru/net/1121390/>
13. Почвенная карта Азовского района Ростовской области, масштаб 1 : 100000. 1978.
14. Почвенная карта колхоза “Ленинское знамя” Азовского района Ростовской области, масштаб 1 : 25000. МСХ РСФСР. Институт “Росгипрозем” Южный филиал. Отпечатано Южным филиалом ВИСХАГИ г. Новочеркасск. 1975.
15. Почвенная карта совхоза “Луч” Азовского района Ростовской области, МСХ РСФСР. Росземпроект. Институт ЮЖГИПРОЗЕМ. Ростов на Дону, 1984.
16. Почвенная карта ТОО “Мир” Азовского района Ростовской области, масштаб 1 : 25000. Роскомзем РСФСР. РосНИИземпроект. Институт ЮЖНИИГИПРОЗЕМ. Ростов на Дону, 1994.
17. Рухович Д.И. Многолетняя динамика засоления орошаемых почв центральной части Голодной степи и методы ее выявления. Дис. ... канд. биол. н. М., 2009. 284 с.
18. Рухович Д.И., Вагнер В.Б., Вильчевская Е.В., Калинина Н.В., Королева П.В. Проблемы использования цифровых тематических карт на территорию СССР при создании ГИС “Почвы России” // Почвоведение. 2011. № 9. С. 1043–1045.
19. Рухович Д.И., Королева П.В., Вильчевская Е.В., Калинина Н.В. Цифровая тематическая картография как смена доступных первоисточников и способов их использования // Цифровая почвенная картография: теоретические и экспериментальные исследования. М., 2012. С. 58–86.
20. Рухович Д.И., Королева П.В., Калинина Н.В., Вильчевская Е.В., Симакова М.С., Долинина Е.А., Рухович С.В. Государственная почвенная карта – версия ArcInfo // Почвоведение. 2013. № 3. С. 251–267.
21. Рухович Д.И., Рухович А.Д., Рухович Д.Д., Симакова М.С., Куляница А.Л., Брызжев А.В., Королева П.В. Информативность коэффициентов а и b линии почв для анализа материалов дистанционного зондирования // Почвоведение. 2016. № 8. С. 903–917.
22. Рухович Д.И., Рухович А.Д., Рухович Д.Д., Симакова М.С., Куляница А.Л., Брызжев А.В., Королева П.В. Построение карт усредненных спектральных отклонений от линии почв и их сравнение с традиционными почвенными картами // Почвоведение. 2016. № 7. С. 794–812.
23. Рухович Д.И., Симакова М.С., Куляница А.Л., Брызжев А.В., Калинина Н.В., Королева П.В., Вильчевская Е.В., Долинина Е.А., Рухович С.В. Влияние лесополос на фрагментацию овражно-балочной сети и образование мочаров // Почвоведение. 2014. № 11. С. 1043–1045.
24. Рухович Д.И., Симакова М.С., Куляница А.Л., Брызжев А.В., Королева П.В., Калинина Н.В., Вильчев-

- ская Е.В., Долинина Е.А., Рухович С.В. Анализ применения почвенных карт в системе ретроспективного мониторинга состояния земель и почвенного покрова // Почвоведение. 2015. № 5. С. 605–625.
25. Рухович Д.И., Симакова М.С., Куляница А.Л., Брызжев А.В., Королева П.В., Калинина Н.В., Вильчевская Е.В., Долинина Е.А., Рухович С.В. Ретроспективный анализ изменчивости землепользования на слитых почвах замкнутых западин Приазовья // Почвоведение. 2015. № 10. С. 1168–1194.
  26. Рухович Д.И., Симакова М.С., Куляница А.Л., Брызжев А.В., Королева П.В., Калинина Н.В., Черноусенко Г.И., Вильчевская Е.В., Долинина Е.А., Рухович С.В. Влияние засоленных почв на изменчивость типов землепользования в Азовском районе Ростовской области // Почвоведение. 2017. № 3. С. 289–310.
  27. Симакова М.С. Почвенные карты // Картографическая изученность России (топографические и тематические карты). М.: Изд-во Ин-та географии РАН, 1999. С. 113–133.
  28. Симакова М.С., Рухович Д.И., Королева П.В., Вильчевская Е.В., Калинина Н.В. Цифровая версия Государственной почвенной карты масштаба 1 : 1 млн, проблемы и решения // Почвоведение. 2012. № 4. С. 387–397.
  29. Составление и использование почвенных карт / Под ред. Кашанского А.Д. М.: Агропромиздат, 1987. 273 с.
  30. Технология составления карт внутриполевой неоднородности по данным ретроспективного мониторинга для составления карт заданий на дифференцированное внесение комплексных удобрений. Сведения о результате интеллектуальной деятельности № АААА-Г18-618030290009-4 02/03/2018. <https://rosrid.ru/rid/YVUTLONSRZTT3KN7ASFCEUEJ>
  31. Федоренко В.Ф., Рухович Д.И., Королева П.В., Вильчевская Е.В., Калинина Н.В., Трубников А.В., Мишунов Н.П. Оценка внутриполевой неоднородности почвенного покрова для технологий координатного земледелия // Техника и оборудование для села. 2017. № 9(243). С. 2–6.
  32. Флейс М.Э., Борисов М.М., Александрович М.В. Картографические проекции и согласование разновременных карт России и Советского союза в геоинформационной среде // Известия РАН. Сер. географическая. 2008. № 5. С. 118–125.
  33. Фридланд В.М. Структуры почвенного покрова мира. М.: Мысль, 1984. 236 с.
  34. Хитров Н.Б., Власенко В.П., Рухович Д.И., Брызжев А.В., Калинина Н.В., Роговнева Л.В. География вертисолов и вертикальных почв кубано-приазовской низменности // Почвоведение. 2015. № 7. С. 771–788.
  35. Шаповалов Д.И., Королева П.В., Калинина Н.В., Рухович Д.И., Сулейман Г.А., Долинина Е.А. Учет и выделение переувлажненных территорий при почвенном картографировании и землеустройстве // Почвоведение. 2020. № 3. С. 291–307. <https://doi.org/10.31857/S0032180X20010141>
  36. Шаповалов Д.А., Королева П.В., Сулейман Г.А., Рухович Д.И. Почвенные контуры публичной кадастровой карты – элементы картографирования почвенно-земельного покрова // Почвоведение. 2019. № 5. С. 613–632.
  37. Шаповалов Д.А., Рухович Д.И., Королева П.В., Калинина Н.В., Вильчевская Е.В., Куляница А.Л. ASF-index – карта устойчивой внутриполевой неоднородности плодородия почвенного покрова, построенная на основе больших спутниковых данных для задач точного земледелия // Международный сельскохозяйственный журнал. 2020.
  38. AGRO-SAT Consulting GmbH // <http://agro-sat.de/>
  39. Azabdaftari A., Sunar F. Soil salinity mapping using multitemporal Landsat data // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, V. XLI-B7, 2016 XXIII ISPRS Congress, 12–19 July 2016, Prague, Czech Republic
  40. De Bernardis C., Vicente-Guijalba F., Martínez-Marin T., Lopez-Sanchez J.M. Particle Filter Approach for Real-Time Estimation of Crop Phenological States Using Time Series of NDVI Images // Remote Sensing. 2016. V. 8(7) P. 610.
  41. Big Data in Agriculture (intel) // <https://www.intel.ru/content/www/ru/ru/big-data/lessons-from-the-field.html>
  42. Big Data Science for Precision Farming Business // [https://semanticcommunity.info/Data\\_Science/Big\\_Data\\_Science\\_for\\_Precision\\_Farming\\_Business](https://semanticcommunity.info/Data_Science/Big_Data_Science_for_Precision_Farming_Business)
  43. De la Casa A., Ovando G., Bressanini L., Martínez J., Díaz G., Miranda C. Soybean crop coverage estimation from NDVI images with different spatial resolution to evaluate yield variability in a plot // ISPRS J. of Photogrammetry and Remote Sensing. 2018. V. 146. P. 531–547.
  44. Cox M., Ellsworth D. Application-controlled demand paging for out-of-core visualization // Proceedings of the 8th conference on Visualization '97 (VIS '97). 1997. IEEE Computer Society Press, Los Alamitos, CA, USA, P. 235–244.
  45. Cropio // <https://about.cropio.com/ru/>
  46. Digital soil mapping: an introductory perspective / Eds.: Ph. Lagshere, A.B. McBratney. 2007. V. 31. 658 p.
  47. ExactFarming // <https://www.exactfarming.com/ru/>
  48. Farifteh J., van der Meer F., Atzberger C., Carranza E. Quantitative Analysis of Salt-Affected Soil Reflectance Spectra: A Comparison of Two Adaptive Methods (PLSR and ANN) // Remote Sensing of Environment. 2007. V. 110(1). P. 59–78. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.02.005>
  49. Farm Management. 2018. Satellite Big Data: How It Is Changing the Face of Precision Farming // <http://www.farmmanagement.pro/satellite-big-data-how-it-is-changing-the-face-of-precision-farming/>
  50. FarmersEdge // <https://www.farmersedge.ca/ru/>
  51. Gallo B.C., Demattê J.A.M., Rizzo R., Safanelli J.L., Mendes W. de S., Lepsch I.F., Sato M.V., Romero D.J., Lacerda M.P.C. Multi-Temporal Satellite Images on Topsoil Attribute Quantification and the Relationship with Soil Classes and Geology // Remote Sensing. 2018. V. 10(10). P. 1571.
  52. Hartemink A.E., Moore A.C., Howell D.W., Boettinger J.L., Kienast-Brown S. Digital soil mapping: bridging research, environmental application, and operation (progress in soil science). Springer, 2010. 473 p.
  53. Huang Y., Chen Z.-X., Yu T., Huang X.-Z., Gu X.-F. Agricultural remote sensing big data: Management and applications // J. Integrative Agriculture. 2018. V. 17(9). P. 1915–1931. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(17\)61859-8](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(17)61859-8)

54. *Hutton J.* Theory of the Earth; or an investigation of the laws observable in the composition, dissolution, and restoration of land upon the Globe // Transactions of the Royal Society of Edinburgh. 1788. V. 1. Part 2. P. 209–304.
55. *Johnson B.* Effects of Pansharping on Vegetation Indices // ISPRS Int. J. Geo-Inf. 3. 2014. P. 507–522.
56. *Kamilaris A., Kartakoullis A., Prenafeta-Boldú F.X.* A review on the practice of big data analysis in agriculture // Computers and Electronics in Agriculture. 2017. V. 143. P. 23–37. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.09.037>
57. *Kauth R.J., Thomas G.S.* The tasseled Cap – A Graphic Description of the Spectral-Temporal Development of Agricultural Crops as Seen by LANDSAT // Proceedings of the Symposium on Machine Processing of Remotely Sensed Data, West Lafayette, Indiana, 29 June–1 July 1976. P. 4B-41 to 4B-51.
58. *Kwan M.-P.* Algorithmic Geographies: Big Data, Algorithmic Uncertainty, and the Production of Geographic Knowledge // Annals of the American Association of Geographers. 2016. V. 106(2). P. 274–282.
59. *Liu P.* A survey of remote-sensing big data // Frontiers in Environmental Science. 2015. 3:45. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2015.00045>
60. *McBratney A.B., Mendonça Santos M.L., Minasny B.* On digital soil mapping // Geoderma. 2003. V. 117(1–2). P. 3–52.
61. *Mendonça-Santos M.L., Dart R.O., Santos H.G., Coelho M.R., Berbara R.L.L., and Lumberras J.F.* Digital soil mapping of topsoil organic carbon content of Rio de Janeiro State, Brazil. In: Digital Soil Mapping – New York: Springer Science + Business Media B.V. 2010. P. 255–266.
62. *Miller H.J., Goodchild M.F.* Data-driven geography // GeoJournal. 2015. V. 80(4). P. 449–461. <https://doi.org/10.1007/s10708-014-9602-6>
63. *Mulder V.L., de Bruin S., Schaepman M.E., Mayr T.R.* The use of remote sensing in soil and terrain mapping—A review // Geoderma. 2011. V. 162. P. 1–19.
64. NASA soil moisture mission produces first global maps. <https://www.jpl.nasa.gov/news/news.php?release=2015-138>
65. NEXT Farming: Smarte Lösungen für Landwirte // <https://www.nextfarming.de/>
66. NEXT Geodata SERVICE // <https://www.nextfarming.com/products/next-farming-service/next-geodata-service/>
67. *Openshaw S.* Geographical data mining: key design issues // Proceedings of the 4th International Conference on GeoComputation, Fredericksburg, Virginia, USA, 25–28 July 1999. [http://www.geocomputation.org/1999/051/gc\\_051.htm](http://www.geocomputation.org/1999/051/gc_051.htm)
68. *Romanenkov V.A., Smith J.U., Smith P., Sirotenko O.D., Rukhovich D.I., Romanenko I.A.* Soil organic carbon dynamics of croplands in European Russia: Estimates from the “model of humus balance” // Regional Environmental Change. Springer, 2007. V. 7(2). P. 93–104.
69. *Shapovalov D.A., Fedorenko V.F., Trubnikov A.V., Koroleva P.V., Rukhovich D.I.* Maps of stable intra-field heterogeneity based on big satellite data in the precision farming system // 19th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2019: conference proceedings, Albena, Bulgaria, 30 June–6 July, 2019. Sofia, 2019. V. 19. № 2.2. P. 903–908.
70. *Shepherd K.D., Walsh M.G.* Development of Reflectance Spectral Libraries for Characterization of Soil Properties // Soil Sci. Soc. Am. J. 2002. V. 66(3). P. 988–998. <https://doi.org/10.2136/sssaj2002.9880>
71. SRTM // <http://srtm.csi.cgiar.org/>
72. *Taghizadeh-Mehrjardi R., Nabiollahi K., Minasny B., Tnantafilis J.* Comparing data mining classifiers to predict spatial distribution of USDA-family soil groups in Baneh region. Iran // Geoderma. 2015. V. 253–254. P. 67–77.

## Analysis of the Information Content of Big Remote Sensing Data Used in Precision Farming Systems for the Correction of Large-Scale Soil Maps

A. L. Kulyanitsa<sup>1</sup>, D. I. Rukhovich<sup>2,\*</sup>, P. V. Koroleva<sup>2</sup>, E. V. Vilchevskaya<sup>2</sup>, and N. V. Kalinina<sup>2</sup>

<sup>1</sup>IT Parma JSC, ul. Kozhevnikovskaya, 7, bld. 1, Moscow, 115114 Russia

<sup>2</sup>Dokuchaev Soil Institute, Pyzhevsky Lane, 7, bld. 2, Moscow, 119017 Russia

\*e-mail: landmap@yandex.ru

The main source of soil information on the arable lands of Russia are large-scale maps made by GIPROZEM. Maps are dated sixties – nineties of the XX century. Since the last tour of surveys there has been an increase in the accuracy of agricultural practices. Currently, archive soil maps need correction (verification, updating, detailing and unification). It is proposed to use maps of stable intra-field heterogeneity (SIFH) of soil fertility based on remote sensing big data. SIFH maps are created as part of the general concept of big data and its components big geodata and big agricultural data. A comparative analysis of archive soil maps with a SIFH map for the territory of southern Russia showed a great potential of SIFH maps for soil cartography. Missing soil mapping units were found, the locations (actualization) of existing ones were clarified, new soils were found that were not marked on the archive maps, a plan for additional soil surveys was compiled as part of the data-driven geography concept. The accuracy of the soil map has been increased to the state of applicability in modern farming systems, including precision farming. A new source of information concerning the spatial heterogeneity of the soil cover and its fertility has appeared.

**Keywords:** intra-field heterogeneity, big data, big satellite data, remote sensing, soil maps, precision farming

УДК 631.425.4

## СОДЕРЖАНИЕ И СОСТАВ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА ПОЧВ ПРИПОЛЯРНОГО УРАЛА

© 2020 г. В. В. Старцев<sup>а</sup>, \*, А. С. Мазур<sup>б</sup>, А. А. Дымов<sup>а</sup><sup>а</sup>Институт биологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН,  
ул. Коммунистическая, 28, Республика Коми, Сыктывкар, 167982 Россия<sup>б</sup>Санкт-Петербургский государственный университет,  
Университетский пр-т, 26, Санкт-Петербург, Ленинградская область, 198504 Россия

\*e-mail: vik.startsev@gmail.com

Поступила в редакцию 27.02.2020 г.

После доработки 13.04.2020 г.

Принята к публикации 27.04.2020 г.

Почвенное органическое вещество (ПОВ) высоких широт является важным и чувствительным индикатором климатических изменений. Рассмотрены основные морфологические свойства и химические характеристики ПОВ основных типов почв в высотном-поясном градиенте Приполярного Урала. Исследованы почвы, формирующиеся в горно-тундровом (подбур глееватый иллювиально-гумусовый/Skeletal Stagnic Entic Podzol (Turbic)), подгольцовом (серогумусовая/Skeletal Umbrisol), горно-лесном (подзол иллювиально-железистый/Skeletal Albic Podzol) поясах и горно-тундровом с подстилкой многолетнемерзлых пород (подбур иллювиально-гумусовый глееватый мерзлотный/Skeletal Follic Cryosol (Humic)). Применен метод денсиметрического фракционирования, позволяющий выделить три фракции ПОВ, отличающиеся по активности участия углерода в биологическом круговороте: фракцию свободного органического вещества ( $COB_{<1.6}$ ), фракцию окклюдированного органического вещества ( $OOB_{<1.6}$ ) и тяжелую фракцию, связанную с минеральной матрицей ( $TF_{>1.6}$ ). В результате выявлено преобладание тяжелой фракции в верхних минеральных горизонтах  $TF_{>1.6}$  (89–93%). Содержание легких фракций значительно меньше (0.6–4.7%). Выявлена тенденция к зависимости содержания органического углерода в почве С и азота N от доли легких фракций  $COB_{<1.6}$  ( $r = 0.40$  и  $r = 0.79$ ,  $p < 0.05$ ) и  $OOB_{<1.6}$  ( $r = 0.68$  и  $r = 0.83$ ,  $p < 0.05$ ). В составе ПОВ денсиметрических фракций преобладают алифатические фрагменты:  $COB_{<1.6}$  (74.5–80.5%) и  $OOB_{<1.6}$  (77.9–84.2%). Выявлено, что органическое вещество фракции  $OOB_{<1.6}$  имеет более высокую степень разложения (0.4–2.4).

**Ключевые слова:** пулы углерода, фракционирование, криолитозона,  $^{13}C$ -ЯМР, Podzols, Umbrisol, Cryosol

DOI: 10.31857/S0032180X20120114

### ВВЕДЕНИЕ

Почва – уникальное природное образование, играющее важную роль в устойчивом функционировании наземных экосистем и биосферы в целом. Почвенное органическое вещество (ПОВ) участвует в реализации почвами основных биосферных функций, является резервуаром элементов питания для растений, служит источником и стоком “парниковых” газов [44]. Органическое вещество северных районов представляет собой уязвимый источник углерода [25, 45] и характеризуется как один из наиболее чувствительных компонентов почв высоких широт к климатическим изменениям. Приполярный Урал – уникальная территория – является южным пределом распространения криолитозоны на европейском северо-востоке России, почвы которой формируются в

контрастных геоморфологических, микроклиматических, гидрологических условиях [4, 13], определяющих различия интенсивности гумусонакопления и передвижения веществ по профилю почв, что отражается в их морфологических, химических характеристиках и особенностях почвенного органического вещества. Качество и количество органического вещества в почве является важной характеристикой, отражающей особенности почвообразования для конкретных климатических условий и типов почв.

В настоящее время в исследованиях состава и структуры ПОВ большое внимание уделяется выделению значимых составляющих органического вещества, обладающих характерными свойствами [24, 29, 48]. Поэтому определение комплекса показателей состава ПОВ является актуальной

задачей современного почвоведения. Денсиметрическое фракционирование способствует выделению фракций, различающихся по активности участия углерода в биологическом цикле и времени пребывания в почве, а ЯМР-спектроскопия позволяет оценить основные тенденции стабилизации ПОВ. Анализ литературы показал, что молекулярный состав органического вещества почв равнинных территорий, в том числе криогенных, детально изучен [6, 7, 15, 22, 39, 51], в то время как исследования ПОВ в горных ландшафтах носят единичный характер [24, 46, 47].

Цель работы – оценить состав органического вещества денсиметрических фракций почв Приполярного Урала.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объектами исследования стали почвы, формирующиеся в горно-лесном, подгольцовом и горно-тундровом поясах Приполярного Урала. Район исследования относится к северной части национального парка “Югыд ва”. В соответствии с почвенно-географическим районированием территория Приполярного Урала относится к округу горно-тундровых и горно-лесных глееподзолистых потечно-гумусовых почв [3]. Регион характеризуется областью редкоостровного распространения многолетнемерзлых пород (ММП) мощностью до 10–15 м [8]. Почвы региона относятся к очень холодному подтипу длительно сезонно-промерзающего типа [2].

Диагностику и классификационное положение почв проводили в соответствии с полевым определителем почв России [9] и системе классификации WRB [30]. Основные физико-химические свойства почв определяли в ЦКП “Хроматография” Института биологии Коми НЦ УрО РАН. Содержание углерода и азота исследовали на элементном анализаторе EA-1110 (Carlo Erba, Италия).

Для изучения ПОВ использовали метод денсиметрического фракционирования, позволяющий выделить различные пулы органического вещества. В результате анализа выделили три фракции ПОВ: свободное ОВ ( $COV_{<1.6}$ ), окклюдированное-внутриагрегатное ОВ ( $OOV_{<1.6}$ ) и связанное с минеральной матрицей  $T\Phi_{>1.6}$ . Фракционирование почв осуществляли раствором поливольфрамата натрия (SPT0) согласно методическим разработкам [20, 24]. Фракцию свободного органического вещества ( $COV_{<1.6}$ ) отделяли раствором с плотностью  $1.60 \pm 0.03$  г/см<sup>3</sup>. Фракцию окклюдированного органического вещества ( $OOV_{<1.6}$ ) отделяли раствором с той же плотностью, после обработки ультразвуком мощностью 150 Дж/см<sup>3</sup> в той же навеске почвы. Тяжелая фракция представляет ПОВ плотностью более  $1.6 \pm 0.03$  г/см<sup>3</sup>.

<sup>13</sup>C-ЯМР воздушно-сухих денсиметрических фракций регистрировали на спектрометре Bruker Avance III 400WB (Bruker, Германия) с рабочей частотой 100.53 МГц с использованием твердофазной методики CP-MAS (кросс-поляризация с вращением под “магическим” углом) в ресурсном центре научных исследований “Магнитно-резонансные методы исследований” Санкт-Петербургского государственного университета. Частота вращения образца – 12.5 кГц, время контакта – 2 мс, время релаксации – 2 с. Химические сдвиги представлены относительно тетраметилсилана со сдвигом 0 м.д., в качестве стандарта использовали пик адамантана. Предварительно образцы обрабатывали 10%-ной плавиковой кислотой для удаления парамагнитных примесей изотопов железа, согласно [26]. Для количественной обработки применяли численное интегрирование по областям, соответствующим расположению функциональных групп и молекулярных фрагментов, с использованием программы TopSpin 3.2 (Bruker, Германия). Используются интервалы интегрирования, согласно [1, 38, 40]: 0–45 – незамещенные алкилы (алифатические фрагменты –CH<sub>2</sub>– и CH<sub>3</sub>-группы) ( $C_{Alk-H(R)}$ ); 45–60 – метоксильные и O,N-замещенные алифатические фрагменты ( $C_{CH_3-O}$ ); 60–95 – O-алкил замещенные алифатические фрагменты ( $C_{Alk-O}$ ); 95–110 – ди-O,N-алифатические фрагменты дважды замещенные гетероатомами ( $C_{O-Alk-O}$ ); 110–145 – незамещенные или алкил-замещенные ароматические структуры ( $C_{Ar-H(C)}$ ); 145–165 – O-замещенные (фенольные) ароматические фрагменты (O-арилы) ( $C_{Ar-O,N}$ ); 165–185 – карбоксильные группы ( $C_{COOH(R)}$ ); 185–220 – карбонилы альдегидов и кетонов ( $C_{C=O}$ ).

Содержания ароматических структур (Ar) определяли по сумме площадей сигналов при 110–145 и 145–165 м.д., алифатических составляющих (Al) – по сумме 0–110, 165–185 и 185–220 м.д. Степень разложения органического вещества оценивали по соотношению алкил (0–45 м.д.) : O,N-алкил (45–110 м.д.). Степень ароматичности (fa) определяли как суммарное содержание ароматических компонентов ( $C_{Ar-H,C}$  и  $C_{Ar-O,N}$ ). Показатель гидрофобности (Hb) рассчитывали по сумме сигналов 0–45 и 110–145 м.д.

Полученные результаты статистически проанализированы с использованием Microsoft Excel 2010 и Statistica 10.0. Для характеристики корреляционных связей между полученными данными использовали дисперсионный анализ при уровне значимости  $p < 0.05$ .

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

**Физико-химические свойства почв.** Распределение почв горных территорий обусловлено их принадлежностью к определенному высотному

растительному поясу. Для Приполярного Урала выделяют горно-тундровый, подгольцовый и горно-лесной высотные растительные пояса [12]. Растительность горно-тундрового пояса представляет собой кустарничково-лишайниковые тундровые ассоциации (*Betula nana* L., *Carex arctisibirica* (Jurtz.), *Cladonia* sp.), формирующие под влиянием криогенного фактора бугорковато-пятнистый и полигональный микрорельеф. В данных условиях формируется подбур глееватый иллювиально-гумусовый/Skeletal Stagnic Entic Podzol (Turbic), который является типичным представителем почв горно-тундрового пояса горных регионов [5]. Подгольцовый пояс Приполярного Урала располагается выше линии леса с нижней границей распространения на высоте 500 м над ур. м. на пологих склонах южной, реже восточной экспозиций [12]. Растительный пояс представлен разнотравными луговинами, которые занимают незначительные пространства, где основную фитоценологическую роль играют злаки и разнотравье [14]. В данном случае – аконитовый луг (*Aconitum septentrionale*, *Calamagrostis purpurea*, *Chamaenerion angustifolium*, *Solidago virgaurea*), в котором развивается серогумусовая почва/Skeletal Umbrisol. Лесные сообщества характеризуются преобладанием лиственницы сибирской (*Larix sibirica* Ledeb.), которая определяет растительный покров горно-лесного пояса западного макросклона Приполярного Урала [17]. Исследуемый подзол иллювиально-железистый/Skeletal Albic Podzol формируется в лиственничнике кустарничково-зеленомошном (*Larix sibirica* L., *Betula nana* L., *Vaccinium myrtillus* L., *Pleurozium schreberi*, *Polytrichum commune*). Кроме этого, на Приполярном Урале формируются почвы, характеризующиеся близким подстилением многолетнемерзлыми породами (ММП). Мерзлотные почвы горных районов составляют около 12% по всему миру. Эти почвы формируются при среднегодовой температуре воздуха  $-5^{\circ}\text{C}$  и характеризуются наличием ММП в пределах 1–2 м от поверхности. На Приполярном Урале под ерничково-лишайниковой тундрой (*Betula nana* L., *Salix glauca*, *Carex arctisibirica*, *Vaccinium vitis-idaea*, *Pleurozium schreberi*, *Aulacomium turgidum*) развивается подбур иллювиально-гумусовый глееватый мерзлотный/Skeletal Follic Cryosol (Humic).

Химические показатели исследованных почв представлены в табл. 1. Показатели кислотности исследованных почв варьируют от сильнокислых для органогенных горизонтов до близких к нейтральным значениям для минеральных. Наибольшей кислотностью характеризуется подзол иллювиально-железистый (рН 3.7–4.8). Сергумусовая почва (рН 5.1–5.6) и подбуры горно-тундрового пояса (рН 4.5–5.7) менее кислые. Наибольшие значения по содержанию обменных катионов кальция ( $\text{Ca}^{2+}$ ) и магния ( $\text{Mg}^{2+}$ ), углерода и азота выявлены для органогенных горизонтов. На-

меньшей степени насыщенности основаниями характеризуется подзол иллювиально-железистый (9–15%). Для серогумусовой почвы выявлено некоторое увеличение насыщенности основаниями в горизонте АУ (61%). Известно, что разнотравные сообщества способствуют высокой степени насыщенности основаниями и содержанию органического вещества. Подбур глееватый иллювиально-гумусовый характеризуется высокой насыщенностью основаниями в минеральных горизонтах (до 67%). В подбуре иллювиально-гумусовом мерзлотном насыщенность основаниями плавно уменьшается по профилю (45–11%). Содержание дитионито- и оксалаторастворимых форм железа и алюминия носит равномерно аккумулятивный характер распределения по профилю подбура глееватого. В серогумусовой почве выявлено иллювиально-иллювиальное распределение соединений железа и алюминия при увеличении их содержания в верхних серогумусовых горизонтах. Для подзола иллювиально-железистого наблюдается типичное обеднение подзолистого горизонта соединениями железа и алюминия и накопление их в иллювиальном горизонте. В подбуре иллювиально-гумусовом мерзлотном выявлена надмерзлотная аккумуляция соединений железа. Содержание углерода и азота носит регрессивно аккумулятивное распределение по профилям исследуемых почв. Максимальные концентрации углерода в верхнем минеральном горизонте выявлены для подбура глееватого – 8.0%, органогенный горизонт которого имеет широкие значения отношения С/Н (30–46), в минеральных – 14–17. В серогумусовой почве содержится 5.6% углерода в горизонте АУ. Наименьшим показателем углерода верхнего горизонта характеризуется подзол иллювиально-железистый – 1.3%. Для лесной подстилки характерно широкое отношение С/Н (31), что свидетельствует о слабом разложении компонентов растительного опада [50]. В минеральных горизонтах показатель варьирует от 11 до 18. Высокий показатель содержания углерода в горизонте ВН выявлен для подбура иллювиально-гумусового мерзлотного (5.9%). Вероятно, суровый климат Приполярного Урала способствует низкой биологической активности почв, что приводит к сохранению органического вещества в минеральных горизонтах.

**Почвенное органическое вещество.** Денсиметрическое (физическое) фракционирование ПОВ оказывает менее разрушительное воздействие на почвы, чем процедура химического разделения. Вероятно, что выделенные фракции представляют собой самостоятельные пулы ПОВ [11], которые непосредственно влияют на почвенную структуру и функции ПОВ *in situ* [21]. Для изучения ПОВ методом денсиметрического фракционирования были исследованы верхние минеральные горизонты.

Анализ полученных денсиметрических фракций почв показал, что основу ПОВ составляет тяжелая

Таблица 1. Физико-химические свойства исследованных почв

Горизонт	Глубина, см	pH	Нг	Ca <sup>2+</sup>		Mg <sup>2+</sup>		V	C	N	C/N	Fe <sub>dith</sub>	Fe <sub>ox</sub>	Al <sub>ox</sub>
				соль(экв)/кг, ±Δ		соль(экв)/кг, ±Δ								
Подбур глееватый иллювиально-гумусовый														
O (L)	0–3	4.5	43	16.1 ± 1.2	3.41 ± 0.26	31	41.0 ± 1.3	1.05 ± 0.19	46	Не опр.				
O (F)	3–7(10)	5.0	35	27.5 ± 2.1	2.71 ± 0.20	46	29.3 ± 0.9	1.15 ± 0.21	30	»				
ВН	7(10)–20(30)	5.4	10	18.7 ± 1.4	1.41 ± 0.14	67	8.0 ± 1.4	0.55 ± 0.10	17	1.14	1.00 ± 0.15	0.6 ± 0.14		
BG	20(30)–50	5.7	5	7.0 ± 0.5	0.87 ± 0.09	60	1.3 ± 0.2	0.11 ± 0.02	14	1.17	0.81 ± 0.12	0.5 ± 0.12		
Серогумусовая почва														
O	0–5	5.6	30	38.7 ± 2.9	1.78 ± 0.18	57	38.6 ± 1.2	1.70 ± 0.30	26	Не опр.				
AУ	5–10	5.1	11	15.4 ± 1.2	0.83 ± 0.08	61	5.6 ± 1.0	0.67 ± 0.12	10	0.92	0.66 ± 0.10	0.4 ± 0.10		
AB	10–25	5.3	8	5.5 ± 0.4	0.31 ± 0.03	42	1.9 ± 0.3	0.28 ± 0.05	8	1.31	0.85 ± 0.13	0.42 ± 0.10		
BC	25–40	5.5	5	7.0 ± 0.5	0.45 ± 0.05	58	2.5 ± 0.4	0.39 ± 0.07	7	1.01	0.63 ± 0.09	0.39 ± 0.09		
C	40–60	5.6	5	4.4 ± 0.3	0.240 ± 0.020	51	0.7 ± 0.1	0.21 ± 0.04	4	0.85	0.39 ± 0.09	0.32 ± 0.08		
Подзол иллювиально-железистый														
O	0–10	3.7	83	6.0 ± 0.4	2.32 ± 0.17	9	40.7 ± 1.3	1.52 ± 0.28	31	Не опр.				
E	10–22	4.4	8	0.76 ± 0.12	0.16 ± 0.03	10	1.3 ± 0.23	0.10 ± 0.02	15	0.81	0.36 ± 0.09	0.19 ± 0.05		
BF	22–40	4.6	7	0.48 ± 0.08	0.17 ± 0.03	9	0.8 ± 0.2	0.06 ± 0.01	14	1.66	0.90 ± 0.14	0.40 ± 0.10		
BCg	40–60	4.8	5	0.67 ± 0.11	0.16 ± 0.03	15	0.5 ± 0.1	0.05 ± 0.01	11	0.91	0.37 ± 0.09	0.26 ± 0.06		
Подбур иллювиально-гумусовый глееватый мерзлотный														
O (L)	0–5	4.9	38	23.3 ± 1.7	7.4 ± 0.6	45	42.3 ± 1.4	1.00 ± 0.18	49	Не опр.				
O (F + H)	5–10(13)	5.4	38	20.3 ± 1.5	4.1 ± 0.3	39	29.4 ± 0.9	1.22 ± 0.22	28	»				
ВН	10(13)–20	5.1	16	5.8 ± 0.4	1.31 ± 0.13	31	5.9 ± 1.1	0.49 ± 0.08	14	2.34	0.99 ± 0.15	0.41 ± 0.10		
BFg <sup>+</sup>	20–40(45)	5.0	15	1.40 ± 0.13	0.38 ± 0.04	11	4.3 ± 0.8	0.32 ± 0.06	16	2.89	1.94 ± 0.29	0.30 ± 0.07		

Примечание. Нг – гидролитическая кислотность, V – степень насыщенности основаниями.

**Таблица 2.** Характеристика денсиметрических фракций

Горизонт	СОВ <sub>&lt;1.6</sub>			ООВ <sub>&lt;1.6</sub>			ТФ <sub>&gt;1.6</sub>		
	мас. %	С, %	С/Н	мас. %	С, %	С/Н	мас. %	С, %	С/Н
Подбур глееватый иллювиально-гумусовый									
ВН	1.9	36.0	32	1.3	42.0	30	92.6	7.8	15
Серогумусовая почва									
АУ	4.7	20.9	18	1.8	34.3	22	89.9	0.40	10
Подзол иллювиально-железистый									
Е	1.0	26.9	38	0.6	37.0	80	93.2	0.73	11
Подбур иллювиально-гумусовый глееватый мерзлотный									
ВН	3.0	31.5	29	1.8	40.9	32	92.4	4.7	14

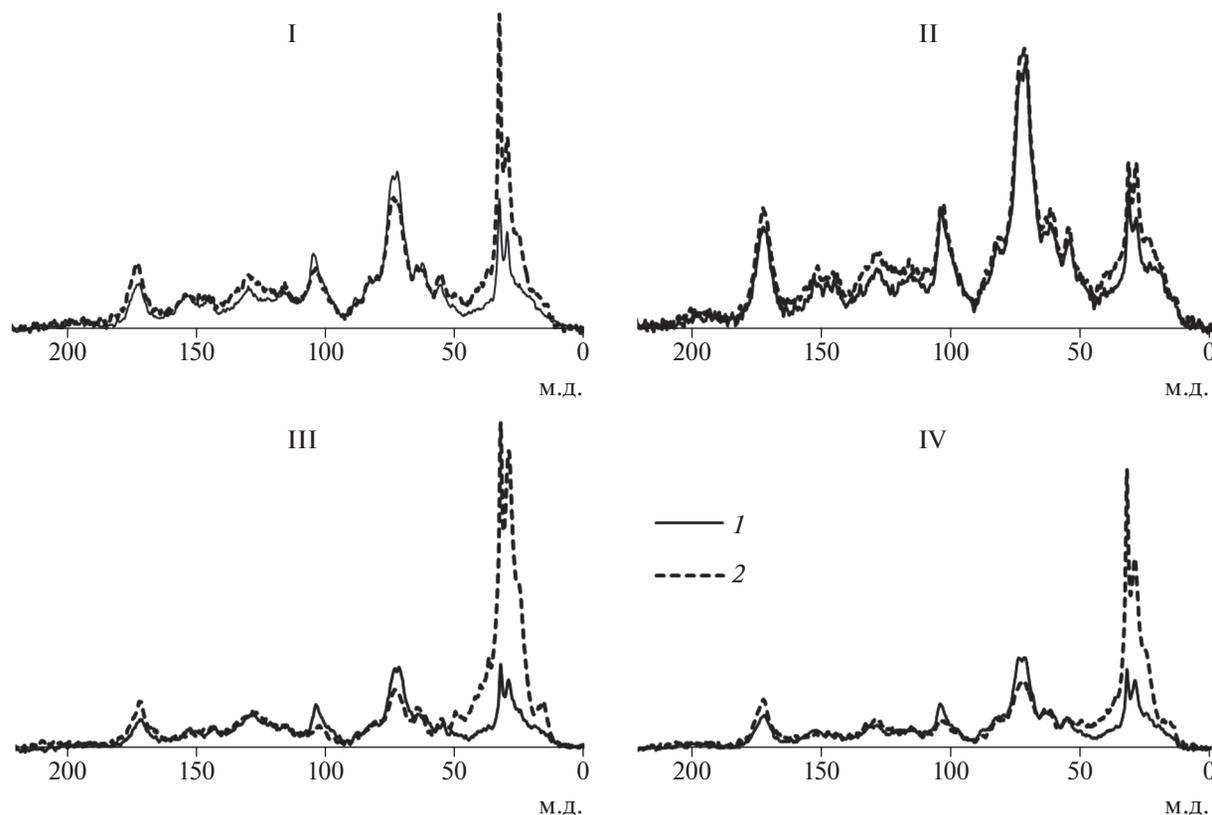
минерально-связанная фракция ТФ<sub>>1.6</sub>, фракции свободного и окклюдированного органического вещества составляют меньшие доли, что отмечают другие исследователи [28, 41]. Характеристики выделенных денсиметрических фракций представлены в табл. 2. В серогумусовой почве выявлено наименьшее содержание фракции ТФ<sub>>1.6</sub> – 89%. В подбуре иллювиально-гумусовой, подзоле иллювиально-железистой и мерзлотном подбуре содержание тяжелой фракции несколько выше и варьирует от 92 до 93%.

Доля легких фракций в почвах значительно меньше. Минимальные показатели выявлены для подзола иллювиально-железистого, формирующегося в горно-лесном поясе. В подзолистом горизонте Е содержание легких фракций свободного и окклюдированного ПОВ составляет 1.6%. В почве горно-тундрового пояса сумма легких фракций равна 3.2%. Подбур иллювиально-гумусовый мерзлотный содержит 4.8% легких фракций. Высокие доли легких фракций в верхних минеральных горизонтах почв горно-тундрового пояса обусловлены рядом факторов: значительный объем обломков горных пород в профиле, пучение льдистой мерзлоты, которые способствуют перемешиванию верхнего минерального горизонта с нижней частью подстилки и проникновению растительных остатков вниз по профилю, низкие температуры почв [23]. Максимальные доли легких фракций были получены для серогумусового горизонта АУ почвы подгольцового пояса. Содержание фракции свободного органического вещества составляет 4.7%, фракции окклюдированного ООВ<sub><1.6</sub> – 1.8%. В разнотравных растительных сообществах подземные органы растений доминируют по биомассе и обуславливают внутрипочвенное поступление органического вещества в минеральные горизонты. Всего доля легких фракций в верхнем минеральном горизонте серогумусовой почвы 6.5%, что в 1.5–2 раза больше, чем в верхних горизонтах почв других высотных поясов.

В целом для верхних минеральных горизонтов почв выявлено преобладание тяжелой фракции. Среди легких фракций большим содержанием характеризуется первая фракция свободного органического вещества СОВ<sub><1.6</sub>, представленная и остатками трав и кустарничков, практически не утративших своего анатомического строения, которые благодаря низким температурам, долго сохраняются и практически не подвергаются трансформации [24]. В отличие от фракции ООВ<sub><1.6</sub>, где хорошо разложившиеся растительные остатки окружены минеральными частицами, защищающими и способствующими долгой консервации органического вещества [52].

Содержание углерода и С/Н во фракциях носит обратный характер. Минимальные концентрации выявлены для органо-минеральной фракции ТФ<sub>>1.6</sub>, которые не превышают 7.8%. Максимальные – для легких фракций органического вещества. Концентрация углерода легких фракций СОВ<sub><1.6</sub> варьирует от 20.9 (серогумусовая) до 36.0% (подбур глееватый иллювиально-гумусовый). Для фракции окклюдированного органического вещества ООВ<sub><1.6</sub> выявлены максимальные концентрации органического углерода, превышающие таковые во фракции СОВ<sub><1.6</sub>. Содержание углерода в них составляет от 34.5 до 42.0%. Наиболее узкими значениями отношения С/Н (от 11 до 15) характеризуются тяжелые фракции, что говорит о высокой степени минерализации ПОВ. Отношение углерода к азоту для легких фракций свидетельствует, что ОВ в них практически не подвергнуто разложению. Для фракции свободного ОВ показатель варьировал 18–38 с минимальным значением для серогумусовой почвы и максимальным для подзола иллювиально-железистого. Отношение С/Н во фракции ООВ<sub><1.6</sub> изменялось в пределах 22–80, максимальный показатель выявлен для верхнего подзолистого горизонта почвы горно-лесного пояса.

Полученные результаты показывают, что состав и свойства физических фракций ПОВ зави-



**Рис. 1.** Спектры ядерного магнитного резонанса на ядрах изотопа  $^{13}\text{C}$ . I – подбур глееватый иллювиально-гумусовый, II – серогумусовая почва, III – подзол иллювиально-железистый, IV – подбур иллювиально-гумусовый глееватый мерзлотный. 1 – фракция  $\text{COB}_{<1.6}$ , 2 – фракция  $\text{OOB}_{<1.6}$ .

сят от климатических условий, принадлежности к определенному высотному поясу, состава напочвенной растительности, наличия или отсутствия подстилки ММП и обломков горных пород в почвенном профиле. Доли легких фракций, наряду с динамикой углерода и азота в них, являются показателями лабильной динамики оборота ПОВ [31]. Характер поступления и динамика накопления органического вещества в почвенном профиле зависят от характера структуры и функций экосистемы. Для почв, формирующихся в горных областях и с близким залеганием ММП, содержание легких денсиметрических фракций  $\text{COB}_{<1.6}$  и  $\text{OOB}_{<1.6}$  может обуславливать физическую устойчивость почв [47]. Поскольку в настоящее время изучению почвенного покрова и круговороту углерода и азота криолитозоны уделяется большое внимание [16] выделение идентификационных пулов может стать важной составляющей в понимании аккумуляции и функций углерода и обмена им с атмосферой.

В ходе работ охарактеризовано распределение углерода по структурным фрагментам органического вещества легких денсиметрических фракций ПОВ методом  $^{13}\text{C}$ -ЯМР спектроскопии. Оценка

молекулярных фрагментов показала различия между фракциями  $\text{COB}_{<1.6}$  и  $\text{OOB}_{<1.6}$  в составе ПОВ, выделенных из почв разных высотных растительных поясов (рис. 1).

При анализе спектров из денсиметрических фракций  $\text{COB}_{<1.6}$  и  $\text{OOB}_{<1.6}$  для всех исследованных почв наблюдается наиболее выраженная интенсивность сигналов в диапазонах 0–45 и 60–95 м.д., которые относятся к алифатическим фрагментам. В литературе отмечают, что пик 0–45 м.д. представлен незамещенными алкилами, состоящими из воско-смол, липидов и субериновых структур из растений [6, 32]. Сигнал 60–95 м.д. представлен группами  $\text{CH}(\text{O})$  из кольцевых атомов целлюлозы, фрагментов углеводов и лигниновыми фрагментами [49]. Установлено, что фракции  $\text{COB}_{<1.6}$  содержат несколько меньше алифатических фрагментов диапазона 0–45 м.д. (17–25%), которые определяют гидрофобные свойства почвенного органического вещества и способствуют увеличению устойчивости к разложению микроорганизмами [33, 36, 43], чем во фракциях  $\text{OOB}_{<1.6}$  (19–54%). Лучшая устойчивость окклюдированного органического вещества обусловлена “защитой” из минеральных почвенных агрега-

**Таблица 3.** Относительное содержание структурных фрагментов и интегральные показатели состава ПОВ легких денсиметрических фракций

Горизонт	Распределение углерода, %								Алкил/ О,N-алкил	fa	Ar/Al	Hb
	C <sub>Alk-H</sub>	C <sub>CH<sub>3</sub>-O</sub>	C <sub>Alk-O</sub>	C <sub>O-Alk-O</sub>	C <sub>Ar-H(C)</sub>	C <sub>Ar-O,N</sub>	C <sub>COOH(R)</sub>	C <sub>C=O</sub>				
	0–45	45–60	60–95	95–110	110–145	145–165	165–185	185–220				
Подбур глееватый иллювиально-гумусовый												
ВН	<u>20</u>	<u>7</u>	<u>34</u>	<u>10</u>	<u>15</u>	<u>7</u>	<u>6</u>	<u>1.3</u>	<u>0.4</u>	<u>22</u>	<u>0.3</u>	<u>35</u>
	31	7	25	7	16	6	7	1.6	0.8	22	0.3	46
Серогумусовая почва												
АУ	<u>17</u>	<u>8</u>	<u>36</u>	<u>10</u>	<u>14</u>	<u>6</u>	<u>8</u>	<u>1.8</u>	<u>0.3</u>	<u>20</u>	<u>0.2</u>	<u>31</u>
	19	8	32	9	15	6	8	2.2	0.4	22	0.3	35
Подзол иллювиально-железистый												
Е	<u>25</u>	<u>6</u>	<u>29</u>	<u>9</u>	<u>19</u>	<u>6</u>	<u>6</u>	<u>0</u>	<u>0.6</u>	<u>26</u>	<u>0.3</u>	<u>44</u>
	54	6	14	3	12	4	6	1	2.4	16	0.2	67
Подбур иллювиально-гумусовый глееватый мерзлотный												
ВН	<u>22</u>	<u>7</u>	<u>33</u>	<u>9</u>	<u>14</u>	<u>6</u>	<u>7</u>	<u>2</u>	<u>0.4</u>	<u>20</u>	<u>0.2</u>	<u>36</u>
	43	7	20	5	11	4	7	2	1.3	16	0.2	54

Примечание. Над чертой – фракция COB<sub><1,6</sub>, под чертой – OOB<sub><1,6</sub>.

тов, окружающих растительные остатки, что подтверждается и ранее полученными результатами [24, 47], в которых показано, что в верхних минеральных горизонтах почв Приполярного Урала органическое вещество окклюзированной фракции лучше сохраняется. В высотном-поясном распределении можно выстроить ряд устойчивости ПОВ фракций COB<sub><1,6</sub> и OOB<sub><1,6</sub> исследованных почв: серогумусовая почва → подбур глееватый иллювиально-гумусовый → подбур иллювиально-гумусовый глееватый мерзлотный → подзол иллювиально-железистый. Закономерность характерна также для диапазона 60–95 м.д., где выявлено увеличение алифатических фрагментов во фракциях COB<sub><1,6</sub> (29–36%) по сравнению с фракциями окклюзированного органического вещества OOB<sub><1,6</sub> (14–32%). Максимальным содержанием характеризуется COB<sub><1,6</sub> горизонта серогумусовой почвы, а минимальным – подзол иллювиально-железистый.

Группа О,N-алкилов в диапазоне 45–110 м.д. представляет собой основные компоненты растительных остатков и уменьшение доли этих молекулярных фрагментов обуславливает основной процесс трансформации растительных остатков в ходе гумификации. Выявлено, что во фракциях окклюзированного органического вещества их меньше, чем во фракциях свободного ПОВ, что согласуется с литературными данными [34]. Содержание О,N-алкилов во фракциях COB<sub><1,6</sub> варьирует от 44 до 53%, во фракциях OOB<sub><1,6</sub> – от 23 до 49%. В данном случае наблюдается обратная зависимость степени гумификации фракций COB<sub><1,6</sub> и OOB<sub><1,6</sub> от типа почвы в высотном-поясном распределении: подзол иллювиально-желези-

стый → подбур иллювиально-гумусовый глееватый мерзлотный → подбур глееватый иллювиально-гумусовый → серогумусовая почва. Аналогично с содержанием алкил фрагментов в легких фракциях ПОВ по отношению алкил/О,N-алкил наблюдается увеличение степени разложения фракций окклюзированного (0.4–2.4) по сравнению с фракцией свободного (0.3–0.6) органического вещества в ряду от серогумусовой почвы до подзола иллювиально-железистого.

Можно сделать предположение, что денсиметрические фракции ПОВ нативных почв северных регионов и горных труднодоступных экосистем могут быть индикаторами климатических изменений. Легкие фракции в первую очередь подвержены разложению микроорганизмами [37], особенно это касается фракции COB<sub><1,6</sub>, обладающей несколько меньшей устойчивостью, чем фракция OOB<sub><1,6</sub>. При возможном потеплении климата скорость разложения органического вещества микроорганизмами увеличится, в результате чего углерод ПОВ будет поступать в атмосферу в виде CO<sub>2</sub> [35]. Сокращение доли легких фракций может указывать на некоторое изменение скорости круговорота ПОВ. Органическое вещество в составе тяжелой фракции лучше защищено и более устойчиво к разложению.

Анализ интегральных показателей молекулярного состава денсиметрических фракций ПОВ показал, что алифатические фрагменты преобладали во всех исследуемых фракциях (табл. 3), что согласуется с ранее полученными данными для препаратов гумусовых веществ, выделенных из почв региона исследования [24]. В большинстве

случаев максимальное содержание алифатических фрагментов выявлено для фракций окклюдированного органического вещества (78–84%). Фракции свободного ОВ характеризуются несколько меньшим их содержанием (74–80%). Вероятно, высокое содержание алифатических фрагментов обусловлено низкой микробиологической активностью почв из-за холодного климата Приполярного Урала, что приводит к аккумуляции органического вещества в верхних горизонтах почв, характерной для почв арктических регионов [10, 19].

Низкая доля ароматических структур в составе легких денсиметрических фракций  $COB_{<1.6}$  (20–26%) и  $OOB_{<1.6}$  (16–22%), согласно [10], может быть обусловлена высокой влажностью и составом напочвенного растительного покрова. Почвы горно-тундрового пояса формируются под мохово-лишайниковыми сообществами, которые обогащены алифатическими соединениями. Подстилки почв горно-лесного пояса содержат труднорастворимые остатки древесных растений богатых лигнином. Травянистые растения подгольцового пояса богаты белковыми соединениями и в них выше доля углеводов [19]. Для почв горно-тундрового пояса также важную роль играет близкое подстиление ММП, в результате чего в почвах образуются анаэробные условия при избыточной влажности, которые снижают активность микроорганизмов и уменьшается скорость преобразования ПОВ [42].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования позволили охарактеризовать зависимость морфологических и химических свойств, состава и структуры органического вещества почв от принадлежности к высотному растительному поясу. В горно-тундровом поясе под мохово-лишайниковой растительностью формируется подбур глееватый иллювиально-гумусовый. Под разнотравным аконитовым лугом подгольцового пояса развивается серогумусовая почва. В листовничнике горно-лесного пояса формируется подзол иллювиально-железистый. В условиях подстиления многолетнемерзлых пород формируются мерзлотные типы почв – подбур иллювиально-гумусовый глееватый мерзлотный.

Следует подчеркнуть, что важной аналитической характеристикой исследованных почв является содержание органического углерода в верхнем минеральном горизонте, которое различно и отражает специфику накопления ОВ в почвах разных высотных растительных поясах. Максимальные концентрации углерода подбура глееватого иллювиально-гумусового – 8.0%, для горизонта ВН подбура иллювиально-гумусового мерзлотного концентрация углерода составляла 5.9%, что объясняется лучшей консервацией ПОВ в условиях низ-

ких температур и подстиления ММП. В верхнем горизонте серогумусовой почвы содержится 5.6% органического углерода в результате внутрипочвенного поступления растительных остатков. Подзол иллювиально-железистый характеризуется минимальными концентрациями углерода (1.3%) из-за слабой аккумуляции ПОВ в верхних горизонтах.

Анализ состава почвенного органического вещества показал, что в основе лежит тяжелая органико-минеральная фракция  $TF_{>1.6}$ , которая содержит минимальные концентрации органического углерода. Легкие фракции ПОВ составляют значительно меньшие доли. Однако именно легкие фракции ПОВ содержат максимальные концентрации органического углерода и азота и, вероятно, определяют общее содержание органического углерода в почве. Полученные результаты молекулярного состава денсиметрических фракций выявили преобладание алифатических фрагментов для всех исследованных почв. Низкая доля ароматических структур в составе легких денсиметрических фракций может быть обусловлена суровым климатом, высокой влажностью почв и близким подстилением ММП, создающих анаэробные условия функционирования микроорганизмов, в результате чего уменьшается скорость разложения и увеличивается аккумуляция ПОВ в минеральных горизонтах. Таким образом, именно фракции свободного  $COB_{<1.6}$  и окклюдированного  $OOB_{<1.6}$  указывают на стабильность ПОВ и могут быть индикаторами изменения климата.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено при финансовой поддержке проекта РФФИ № 18-34-00618 “Особенности органического вещества почв Приполярного Урала” и комплексной программы фундаментальных научных исследований УрО РАН № 18-4-4-14 “Разнообразие основных компонентов экосистем в широтном и высотном градиентах западного макросклона Северного и Приполярного Урала”.

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гречищева Н.Ю.* Разработка научных основ применения гуминовых веществ для ликвидации последствий нефтезагрязнения почвенных и водных сред. Автореф. дис. ... докт. хим. наук. Иваново, 2017.
2. *Димо В.Н.* Тепловой режим почв СССР. М.: Колос, 1972. 360 с.
3. *Добровольский Г.В., Уруевская И.С.* География почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1984. 460 с.
4. *Дымов А.А., Жангуров Е.В., Старцев В.В.* Почвы северной части Приполярного Урала: морфология,

- физико-химические свойства, запасы углерода и азота // Почвоведение. 2013. № 5. С. 507–516. <https://doi.org/10.7868/S0032180X1305002X>
5. Дымов А.А., Жангуров Е.В. Разнообразие и генетические особенности почв Приполярного Урала // Научно-практический журнал пермский аграрный вестник. 2014. С. 45–52.
  6. Ларионова А.А., Золотарева Б.Н., Колягин Ю.Г., Квиткина А.К., Каганов В.В., Кудеяров В.Н. Состав структурных фрагментов и интенсивность минерализации органического вещества в почвах зонального ряда // Почвоведение. 2015. № 10. С. 1232–1241. <https://doi.org/10.7868/S0032180X15100068>
  7. Лодыгин Е.Д., Безносиков В.А., Василевич Р.С. Молекулярный состав гумусовых веществ тундровых почв ( $^{13}\text{C}$ -ЯМР-спектроскопия) // Почвоведение. 2014. № 5. С. 546–552. <https://doi.org/10.7868/S0032180X14010079>
  8. Оберман Н.Г. Мерзлые породы и криогенные процессы Восточно-Европейского сектора субарктики // Почвоведение. 1998. № 5. С. 540–550.
  9. Полевой определитель почв России. М., 2008. 182 с.
  10. Поляков В.И., Чегодаева Н.А., Абакумов Е.В. Молекулярный и элементный состав гуминовых кислот выделенных из почв Российской Арктики // Вестник Том. гос. ун-та. Биология. 2019. № 47. С. 6–21. <https://doi.org/10.17223/19988591/47/1>
  11. Семенов В.М., Лебедева Т.Н., Паутова Н.Б. Дисперсное органическое вещество в необрабатываемых и пахотных почвах // Почвоведение. 2019. № 4. С. 440–450. <https://doi.org/10.1134/S0032180X19040130>
  12. Старцев В.В., Жангуров Е.В., Дымов А.А. Характеристика почв высотных поясов хребта Яптыкнырд (Приполярный Урал) // Вестник. Том. гос. ун-та. Биология. 2017. № 38. С. 6–27. <https://doi.org/10.17223/19988591/38/1>
  13. Старцев В.В., Дубровский Ю.А., Жангуров Е.В., Дымов А.А. Пространственная неоднородность свойств почв в зоне распространения островной мерзлоты (Приполярный Урал) // Вестник Том. гос. ун-та. Биология. 2019. № 48. С. 32–55. <https://doi.org/10.17223/19988591/48/2>
  14. Флоры, лишено- и микобиоты особо охраняемых ландшафтов бассейнов рек Косью и Большая Сыня (Приполярный Урал, национальный парк “Югыд ва”) / Под ред. Дегтевой С.В. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2016. 483 с.
  15. Холодов В.А., Константинов В.И., Кудрявцев А.В., Перминова И.В. Строение гуминовых кислот почв зонального ряда по данным спектроскопии ЯМР  $^{13}\text{C}$  // Почвоведение. 2011. № 9. С. 1064–1073. <https://doi.org/10.1134/S0032180X11090036>
  16. Шепелев А.Г., Старостин Е.В., Фёдоров А.Н., Максимов Т.Х. Предварительный анализ запасов органического углерода и азота в породах ледового комплекса Центральной Якутии // Наука и образование. 2016. № 2. С. 35–42.
  17. Юдин Ю.П. Растительный мир. Производительные силы Коми АССР. М.: Изд-во АН СССР, 1954. Т. III. Ч. I. 375 с.
  18. Abakumov E., Lodygin E., Tomashunas V.  $^{13}\text{C}$  NMR and ESR Characterization of humic substances isolated from soils of two Siberian Arctic Islands // Int. J. Ecology. V. 2015. P. 390–591. <https://doi.org/10.1155/2015/390591>
  19. Amelung W., Flach K.W., Zech W. Climatic effects on soil organic matter composition in the great plains // Soil Sci. Soc. Am. J. 1997. V. 61. P. 115–123. <https://doi.org/10.2136/sssaj1997.03615995006100010018x>
  20. Cerli C., Celi L., Kalbitz K., Guggenberger G., Kaiser K. Separation of light and heavy organic matter fractions in soil – Testing for proper density cut-off and dispersion level // Geoderma. 2012. V. 170. P. 403–416.
  21. Christensen B.T. Physical fractionation of soil and structural and functional complexity in organic matter turnover // Eur. J. Soil Sci. 2001. V. 52. P. 345–353.
  22. Dai X.Y., Ping C.L., Candler R., Haumaier L., Zech W. Characterization of soil organic matter fractions of tundra soils in arctic Alaska by Carbon-13 nuclear magnetic resonance spectroscopy // Soil Sci. Soc. Am. J. 2001. V. 65. P. 87–93. <https://doi.org/10.2136/sssaj2001.65187x>
  23. Dörfer C., Kühn P., Baumann F., He J.-S., Scholten T. Soil Organic Carbon Pools and Stocks in Permafrost-Affected Soils on the Tibetan Plateau // PLoS ONE. 2013. V. 8(2). P. e57024. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0057024>
  24. Dymov A.A., Zhangurov E.V., Hagedorn F. Soil organic matter composition along altitudinal gradients in permafrost affected soils of the Subpolar Ural Mountains // Catena. 2015. V. 131. P. 140–148. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.03.020>
  25. Ejarque E., Abakumov E. Stability and biodegradability of organic matter from Arctic soils of Western Siberia: Insights from  $^{13}\text{C}$ -NMR spectroscopy and elemental analysis // Solid Earth. 2016. V. 7(1). P. 153–165. <https://doi.org/10.5194/se-7-153-2016>
  26. Goncalves C.N., Dalmolin S.D., Dick D.P., Knicker H., Klant E., Kögel-Knabner I. The effect of 10% HF treatment on resolution of CPMAS  $^{13}\text{C}$  NMR spectra and on the quality of organic matter in Ferralsols // Geoderma. 2003. V. 116. P. 373–392.
  27. Grünewald G., Kaiser K., Jahn R., Guggenberger G. Organic matter stabilization in young calcareous soils as revealed by density fractionation and analysis of lignin-derived constituents // Org. Geochem. 2006. V. 37. P. 1573–1589.
  28. Guareschi R., Pereira M., Perin A. Densimetric fractionation of organic matter in an agricultural chronosequence in no-till areas in the Cerrado region, Brazil // Semina: Ciências Agrárias, Londrina. 2016. V. 37. P. 595–610. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2016v37n2p595>
  29. Hutta M., Gora R., Halko R., Chalanyova M. Some theoretical aspects in the separation of humic substances by combined liquid chromatography methods // J. Chromatography A. 2011. V. 1218. P. 8946–8957. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2011.06.107>
  30. 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 No. 106. Rome: FAO.
31. Janzen H.H., Campbell C.A., Brandt S.A., Lafond G.P., Townley-Smith L. Light-fraction organic matter in soils from long-term crop rotations // Soil Sci. Soc. Am. J. 1992. V. 56. P. 1799–1806.
  32. Keeler C., Kelly E.F., Maciel G.E. Chemical-structural information from solid-state <sup>13</sup>C NMR studies of a suite of humic materials from a lower montane forest soil, Colorado, USA // Geoderma. 2006. V. 130. № 1–2. P. 124–140.  
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2005.01.015>
  33. Kögel-Knabner I. <sup>13</sup>C and <sup>15</sup>N NMR spectroscopy as a tool in soil organic matter studies // Geoderma. 1997. V. 80. P. 243–270.  
[https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(97\)00055-4](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(97)00055-4)
  34. Kölbl A., Kögel-Knabner I. Content and composition of free and occluded particular organic matter in differently textured arable Cambisol as revealed by solid state <sup>13</sup>C NMR spectroscopy // J. Plant Nutrition Soil Sci. 2004. V. 167. P. 45–53.  
<https://doi.org/10.1002/jpln.200321185>
  35. Lee H., Schuur E.A.G., Vogel J.G. Soil CO<sub>2</sub> production in upland tundra where permafrost is thawing // J. Geophys. Res. 2010. V. 115. G01009.  
<https://doi.org/10.1029/2008JG000906>
  36. Lodygin E., Beznosikov V., Abakumov E. Humic substances elemental composition of selected taiga and tundra soils from Russian European North-East // Polish Polar Res. 2017. V. 38. P. 125–147.  
<https://doi.org/10.1515/popore-2017-0007>
  37. Ludwig M., Achtenhagen J., Miltner A., Eckhardt K., Leinweber P., Emmerling C., Thiele-Bruhn S. Microbial contribution to SOM quantity and quality in density fractions of temperate arable soils // Soil Biol. Biochem. 2015. V. 81. P. 311–322.  
<https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2014.12.002>
  38. Mastrolonardo G., Francioso O., Di Foggia M., Bonora S., Forte C., Certini G. Soil pyrogenic organic matter characterisation by spectroscopic analysis: a study on combustion and pyrolysis residues // J. Soils Sediments. 2015. V. 15. P. 769–780.  
<https://doi.org/10.1007/s11368-014-1034-x>
  39. Michaelson G.J., Ping C.L., Epstein H.E., Kimble J.M., Walker D.A. Soils and frost boil ecosystems across the North American Arctic Transect // J. Geophys. Res. 2008. 113. G03S11.  
<https://doi.org/10.1029/2007JG000672>
  40. Miesel J.R., Hockaday W.C., Kolka R.K., Townsend P.A. Soil organic matter composition and quality across fire severity gradients in coniferous and deciduous forests of the southern boreal region // J. Geophysic. Res. Biogeosci. 2015. V. 120. P. 1124–1141.  
<https://doi.org/10.1002/2015JG002959>
  41. Mikutta R., Turner S., Schippers A., Gentsch N., Meyer-Stüve S., Condrón L.M., Peltzer D.A., Richardson S.J., Eger A., Hempel G., Kaiser K., Klotzbücher T., Guggenberger G. Microbial and abiotic controls on mineral-associated organic matter in soil profiles along an ecosystem gradient // Sci Rep. 2019. V. 9. P. 10294.  
<https://doi.org/10.1038/s41598-019-46501-4>
  42. Polyakov V., Zazovskaya E., Abakumov V. Molecular composition of humic substances isolated from selected soils and cryconite of the Grøn fjorden area. Spitsbergen // Polish Polar Res. 2019. V. 40. P. 105–120.  
<https://doi.org/10.24425/ppr.2019.128369>
  43. Santin C., Doerr S.H., Merino A., Bryant R., Loader N.J. Forest floor chemical transformations in a boreal forest fire and their correlations with temperature and heating duration // Geoderma. 2016. V. 264. P. 71–80.  
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.09.021>
  44. Schmidt M.W.I., Torn M.S., Abiven S., Dittmar T., Guggenberger G., Janssens I.A., Kleber M., Kögel-Knabner I., Lehmann J., Manning D.A.C., Nannipieri P., Rasse D.P., Weiner S., Trumbore S.E. Persistence of soil organic matter as an ecosystem property // Nature. 2011. V. 478(7367). P. 49–56.  
<https://doi.org/10.1038/nature10386>
  45. Schuur E.A.G., McGuire A.D., Grosse G., Harden J.W., Hayes D.J., Hugelius G., Koven C.D., Kuhry P. Climate change and the permafrost carbon feedback // Nature. 2015. V. 520. P. 171–179.  
<https://doi.org/10.1038/nature14338>
  46. Sjögersten S., Turner B.L., Mahieu N., Condrón L.M., Wookey P.A. Soil organic matter biochemistry and potential susceptibility to climatic across the forest-tundra ecotone in the Fennoscandian mountains // Glob. Chang. Biol. 2003. V. 9. P. 759–772.  
<https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2003.00598.x>
  47. Startsev V.V., Khaydapova D.D., Degteva S.V., Dymov A.A. Soils on the southern border of the cryolithozone of European part of Russia (the Subpolar Urals) and their soil organic matter fractions and rheological behavior // Geoderma. 2020.  
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.114006>
  48. Sutton R., Sposito G. Molecular structure in soil Humic Substances: The new view // Environ. Sci. Technol. 2005. V. 23. P. 9009–9015.  
<https://doi.org/10.1021/es050778q>
  49. Tadini A.M., Pantano G., Toffoli A.L., Fontaine B., Spaccini R., Piccolo A., Moreira A.B., Bisinoti M.C. Off-line TMAH-GC/MS and NMR characterization of humic substances extracted from river sediments of northwestern São Paulo under different soil uses // Sci. Total Environ. 2015. V. 506–507. P. 234–240.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.11.012>
  50. Valtera M., Šamonil P. Soil organic carbon stocks and related soil properties in a primary *Picea abies* (L.) Karst. volcanic-mountain forest // Catena. 2018. V. 165. P. 217–227.  
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.01.034>
  51. Vasilevich R., Lodygin E., Abakumov E. Molecular composition of humic substances isolated from permafrost peat soils of the eastern European Arctic // Polish Polar Res. 2019. V. 39. P. 481–503.  
<https://doi.org/10.24425/118757>
  52. Waldrop M.P., Wickland K.P., White III R., Berhe A.A., Harden W., Romanovsky V.E. Molecular investigation into a globally important carbon pool: permafrost protected carbon in Alaskan soils // Glob. Chang. Biol. 2010. V. 16. P. 254–255.  
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.02141.x>

## The Content and Composition of Organic Matter of Soils of the Subpolar Urals

V. V. Startsev<sup>1, \*</sup>, A. S. Mazur<sup>2</sup>, and A. A. Dymov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Biology, Komi Scientific Center, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Syktyvkar, 167982 Russia*

<sup>2</sup>*Saint Petersburg University, Saint Petersburg, 198504 Russia*

*\*e-mail: vik.startsev@gmail.com*

Soil organic matter (SOM) at high latitudes is an important and sensitive indicator of climate change. This article describes the main morphological features, chemical properties, and composition of organic matter in the main types of soils along the altitudinal gradient of the Subpolar Urals. Soils forming in the mountainous tundra zone (gleyc humus-illuvial podbur/Skeletal Stagnic Entic Podzol (Turbic)), in the mountainous sub-alpine zone (gray-humus soil/Skeletal Umbrisol), in the mountainous taiga zone (iron-illuvial podzol/Skeletal Albic Podzol), and in the mountainous tundra zone with permafrost (permafrost-affected gleyc humus-illuvial podbur/Skeletal Follic Cryosol (Humic)) were studied. The method of densimetric fractionation was applied to study soil organic matter; it allowed us to distinguish between three fractions of organic matter differing in the activity of carbon participation in the biological turnover: the free particulate organic matter fPOM<sub><1.6</sub>, the occluded particulate organic matter oPOM<sub><1.6</sub>, and the heavy organic matter bound with the mineral phase MaOM<sub>>1.6</sub>. The latter fraction predominated in the upper mineral soil horizons and constituted 89–93% of the total organic carbon. The content of light fractions was significantly lower (0.6–4.7%). However, the content of organic carbon and nitrogen in the studied soils directly correlated with the contents of light fractions fPOM<sub><1.6</sub> ( $r = 0.40$  and  $r = 0.79$ ,  $p < 0.05$ ) and oPOM<sub><1.6</sub> ( $r = 0.68$  and  $r = 0.83$ ,  $p < 0.05$ ). Aliphatic fragments predominated in the composition of POM; their content varied from 74.5 to 80.5% for fPOM<sub><1.6</sub> and from 77.9 to 84.2% for oPOM<sub><1.6</sub>. In addition, it was found that the organic matter of the oPOM<sub><1.6</sub> fraction has a higher degree of decomposition (0.4–2.4) and hydrophobicity (34.7–66.5%).

*Keywords:* soil organic matter, Subpolar Urals, densimetry, <sup>13</sup>C-NMR, Podzol, Umbrisol, Cryosol

УДК 631.417

## ИЗОТОПНЫЙ СОСТАВ УГЛЕРОДА ПОЧВЕННЫХ ЛИПИДОВ В РАЙОНЕ РАЗРАБОТКИ НЕФТЕГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ (ВОЛГОГРАДСКАЯ ОБЛАСТЬ)

© 2020 г. А. Д. Белик<sup>а, \*</sup>, Ю. К. Васильчук<sup>а</sup>, А. Н. Геннадиев<sup>а</sup>, Н. А. Буданцева<sup>а</sup>,  
А. П. Жидкин<sup>б</sup>, Р. Г. Ковач<sup>а</sup>, Т. С. Кошовский<sup>а</sup>

<sup>а</sup>МГУ им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы, 1, Москва, 119991 Россия

<sup>б</sup>Почвенный институт им. В.В. Докучаева, Пыжевский пер., 7, стр. 2, Москва, 119017 Россия

\*e-mail: ms.anna.belik@gmail.com

Поступила в редакцию 29.04.2020 г.

После доработки 18.06.2020 г.

Принята к публикации 21.06.2020 г.

Получены и проинтерпретированы данные об изотопном составе углерода липидов в почвах района Жирновского и Бахметьевского нефтегазовых месторождений в бассейне р. Медведица, Волгоградская область. Сделан вывод о нефтяном и атмосферно-седиментационном загрязнении почв. Вариации изотопного состава определяются как антропогенными факторами, так и разнообразием природных условий. Изотопный состав углерода липидов почв междуречий (черноземов и агрочерноземов) тяжелее (–26.9...–29.2‰), чем аллювиальных почв (–29.4...–31.3‰) из-за различий в условиях увлажнения и температурного режима. Нефтяное загрязнение выражается в более легком изотопном составе (–29.3...–29.8‰), поскольку изотопный состав углерода нефти в целом несколько легче (–28.4...–30.6‰), чем почв. Городская и транспортная инфраструктура приводит к облегчению изотопного состава атмосферного CO<sub>2</sub>, таким образом влияя на величины δ<sup>13</sup>C растительного и почвенного углерода.

**Ключевые слова:** степи, нефтяное загрязнение, изотопы углерода, антропогенное влияние, черноземы текстурно-карбонатные (Calcic Chernozems)

**DOI:** 10.31857/S0032180X20120035

### ВВЕДЕНИЕ

Липиды – это все органические вещества, растворимые в органических растворителях [15] и нерастворимые в воде. Изотопный состав углерода различных фракций органического вещества почв, в том числе почвенных липидов, исследовался для различных объектов. Первые обобщения особенностей изотопного состава в почвенных и растительных системах были сделаны в середине прошлого века. Изотопный состав углерода почв является производным от изотопного состава углерода растений, который, в свою очередь – от изотопного состава атмосферного углерода [3, 12, 19, 23, 26]. Кроме того, на изотопный состав различных компонентов почвенно-растительной системы влияют процессы антропогенного загрязнения, как прямо (непосредственное поступление поллютантов в почву и растения), так и косвенно (через изменение изотопного состава атмосферного воздуха и атмосферных аэрозолей) [20, 22].

На изотопный состав углерода почвенных липидов влияет множество факторов, каждый из

которых накладывает свой отпечаток, что позволяет идентифицировать и оценить влияние этих факторов.

Предположительно, изотопный состав углерода почвенных липидов регулируется следующими факторами: а) изотопным составом углерода растений; б) микробиологической активностью почв; в) изотопным составом нефти в разливах при их наличии; г) изотопным составом сжигаемого транспортного топлива, мазута, угля, дров в районе исследуемых почв; д) возможным изотопным составом глубинных эманаций из нефтяных и газовых месторождений.

Для растительности с типом фотосинтеза C3 характерны значения δ<sup>13</sup>C от –24 до –34‰ [26]. При этом изотопный состав углерода органического вещества растений, как было установлено экспериментально [3], имеет величины δ<sup>13</sup>C от –24 до –28‰. Микробиологическая почвенная активность постепенно повышает значения δ<sup>13</sup>C с возрастом растительных остатков в почве, поскольку в микробиологические реакции в первую

очередь вовлекаются молекулы, содержащие легкий изотоп  $^{12}\text{C}$ , и их превращение в углекислый газ и выведение из системы почвы происходит быстрее [26]. Изотопный состав углерода растений в городах испытывает влияние городского техногенеза: с одной стороны, в городских условиях растения потребляют изотопно более легкий углекислый газ, с другой, повышенное содержание оксидов серы в воздухе влияет на газообмен растений, в результате чего может происходить утяжеление растительного углерода на 3–4‰ [13, 28].

Значения  $\delta^{13}\text{C}$  нефти варьируют от –27 до –31‰ [8, 31]. В Волгоградской области эти характеристики составляют в среднем –29‰; для сильно загрязненных нефтью почв можно предполагать близкие величины.

Изотопный состав углерода в аэрозолях воздуха городов более тяжелый, чем в ненарушенных ландшафтах [7]. Он зависит от источника аэрозолей и вида сжигаемого топлива. Так, транспортные эмиссии имеют изотопный состав углерода от –24 до –28‰, промышленные – от –23 до –27‰, в то время как для аэрозолей растительного происхождения (растительные частицы, пыльца) характерны значения от –25 до –34‰ [7]. При горении биомассы образуются изотопно более легкие аэрозоли, чем при горении ископаемого топлива [10, 11].

Таким образом, очевидна связь между изотопным составом почвенных липидов и факторами окружающей среды. В большинстве опубликованных работ по изотопному составу углерода почв такие связи выявляются [5, 14]. Однако они касаются, как правило, отдельных факторов, и практически нет исследований, в которых осуществляется комплексная сопряженная оценка нескольких факторов.

В данной работе для исследования выбрали территорию Жирновского и Бахметьевского нефтегазовых месторождений в долине р. Медведица в Волгоградской области. Исследован старый промышленный район, где происходит активная добыча нефти и газа, а также развита городская и транспортная инфраструктура, то есть в пределах ограниченной площади имеет место разнородное техногенное и природное влияние на окружающую среду. Исследованы почвы трех ключевых участков: Жирновского нефтяного промысла, Бахметьевского нефтегазового промысла и г. Жирновск.

Цель работы – изучение изотопного состава углерода почвенных липидов и их разнообразия в указанном районе и индикация на основе этих показателей различных факторов воздействия на почвенный покров.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

**Физико-географическая характеристика территории.** Согласно физико-географическому районированию, исследованная территория относится к степной зоне, к Нижнедонской провинции.

Рельеф территории равнинный, но сильно расчленен многочисленными оврагами, балками и небольшими речками, впадающими в р. Медведицу. Балки имеют глубины врезов до 80–100 м. Межбалочные водораздельные поверхности неширокие, выпуклые с пологими волнистыми склонами, подверженными водной эрозией.

Климат территории умеренно континентальный, с холодной зимой и жарким засушливым летом. Самый холодный месяц – январь со среднемесячной температурой –10.5°C, самый теплый – июль со среднемесячной температурой +21.0°C. Устойчивый снежный покров образуется в первой декаде декабря, наибольшая мощность его отмечается в январе–феврале и достигает в отдельные годы 45 см [2].

Территория располагается в пределах подзоны разнотравно-типчаково-ковыльных умеренно-засушливых степей. В растительном покрове господствуют дерновинные злаки – ковыль (*Stipa*), пырей ползучий (*Elytrigi arepens*), мятлик узколистный (*Poa angustifolia*), костер (*Bromus*), а также осоки (*Carex*). К “южному” ксерофитному разнотравью здесь относятся люцерна (*Medicago*), донник (*Melilotus*), чабрец (*Thymus*), подмаренник (*Galium*), шалфей (*Salvia*), синеголовник плосколистный (*Eryngium planum*) и равнинный (*Eryngium campestre*), кермек (*Limonium*) и др. [2, 6].

Территория находится в переходной части между черноземными и каштановыми почвами. Согласно работе Шурлаевой и Рябининой [7], площадь темно-каштановых почв составляет 55%, каштановых почв – 22% и южных черноземов – 14%. По гранулометрическому составу почвы суглинистые и легкосуглинистые. Опробованные почвы относятся к типам черноземов, агро-черноземов текстурно-карбонатных и дисперсно-карбонатных на бурых карбонатных суглинках (табл. 1). Встречаются темно- и серогумусовые почвы, образованные на антропогенно-преобразованных (перемешанных) грунтах. Почвы в границах г. Жирновск представлены серогумусовыми на перевеянных песках под сосновой растительностью. Кроме того, отмечаются аллювиальные серогумусовые, в том числе глееватые почвы. Встречаются также химически загрязненные почвы. Среди них есть как почвы со слабыми визуальными признаками загрязнения, так и полностью пропитанные нефтью из-за нефтяных разливов и функционирования нефтедобывающей инфраструктуры.

**Полевые методы исследования.** Отбор почвенных проб проводился на трех ключевых участках:

Таблица 1. Величины изотопного состава почвенных липидов в исследуемых почвах

Тип почвы	Индекс	Глубина, см	$\delta^{13}C$	Тип почвы	Индекс	Глубина, см	$\delta^{13}C$	
Аллювиальные почвы								
Аллювиальная серогумусовая	Ж16	0-10	-29.9	Нефтезагрязненные почвы	ЖБ4	0-10	-29.38	
		10-40	-29.66			10-40	-28.18	
	Аллювиальная серогумусовая глееватая	40-80	-29.41		ЖБ5	0-10	-29.34	
		0-10	-29.56			0-10	-29.85	
Аллювиальная серогумусовая	ЖБ1	0-10	-27.73	ЖГ3	0-10	-29.29		
	ЖБ15	80-120	-26.21		120-160	-27.48		
Аллювиальная серогумусовая	ЖГ4	0-10	-31.3	Ж3	40-80	-24.38		
						-28.94		
Среднее значение $\delta^{13}C$ для слоя 0-10 см, ‰								
			-29.6					
Городские почвы								
Серогумусовая оподзоленная ожелезненная	ЖГ1	0-10	-28.87	Ж2	0-10	-28.87		
						Серогумусовая оподзоленная ожелезненная турбирванная	Ж4	80-120
Аллювиальная серогумусовая глееватая	ЖГ4	0-10	-30.18	Ж5	0-10	-28.81		
		10-40	-30.1		10-40	-26.91		
Аллювиальная серогумусовая	ЖГ5	80-120	-29.15	Ж6	10-40	-26.75		
		0-10	-30.64		10-40	-29.17		
Среднее значение $\delta^{13}C$ для слоя 0-10 см, ‰								
			-29.5					
Незагрязненные почвы								
Серогумусовая оподзоленная ожелезненная турбирванная	ЖГ2	0-10	-26.83	Ж7	0-10	-27.61		
						Аллювиальная серогумусовая глееватая	ЖБ2	120-160
Аллювиальная серогумусовая	ЖГ5	0-10	-30.64	ЖБ3	10-40	-28.65		
		10-40	-29.15		80-120	-27.5		
Среднее значение $\delta^{13}C$ в слое 0-10 см, ‰								
			-28.2					

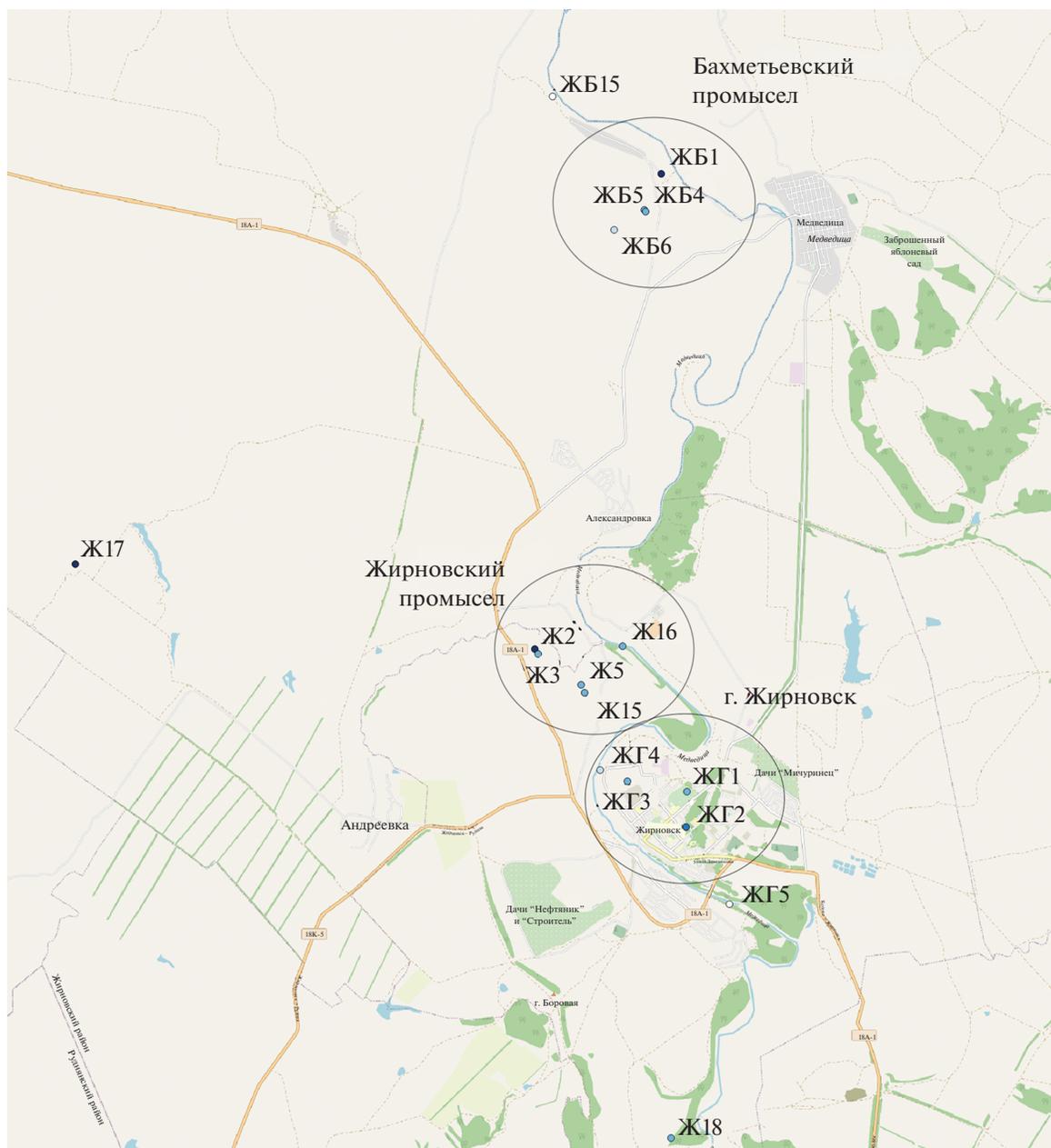


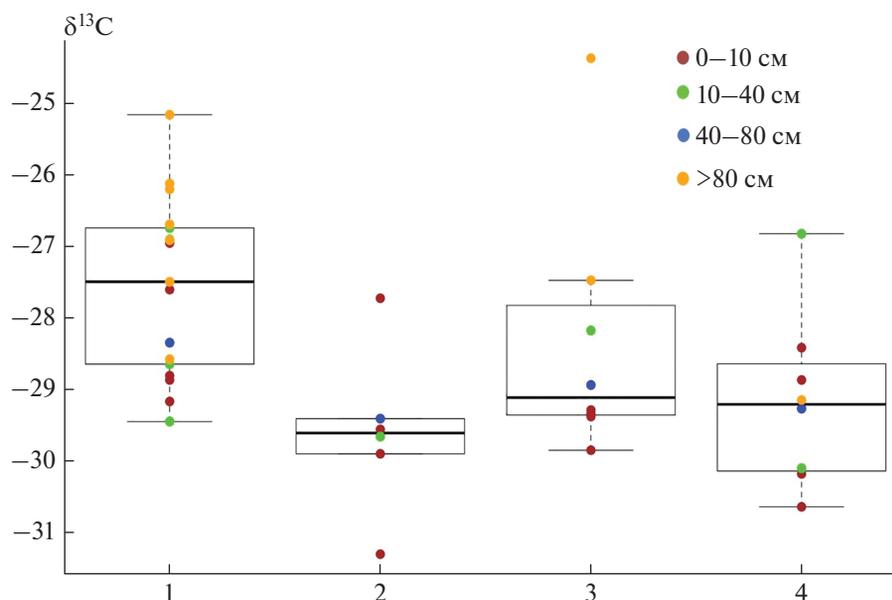
Рис. 1. Схема пробоотбора в районе Жирновского и Бахметьевского нефтегазовых месторождений.

в пределах Жирновского месторождения, в пределах Бахметьевского месторождения (на территории нефтяного промысла и на неразрабатываемой части территории месторождения), а также в г. Жирновск (рис. 1). Образцы почвы отбирали послойно с глубин 0–10, 10–40, 40–80, 80–120 и более 120 см с помощью ручного бура. Образцы весом 150–200 г транспортировали далее в зип-пакетах.

**Пробоподготовка и лабораторные методы исследования.** Образцы сушили при комнатной температуре до воздушно-сухого состояния, затем растирали. Растертые образцы просеивали через си-

то 0.25 мм и далее хранили в зип-пакетах при комнатной температуре до проведения лабораторных анализов.

Липиды экстрагировали из 45 образцов почв, отобранных из 22 разрезов с различных глубин. Липиды извлекали методом холодной экстракции хлороформом. Образцы почвы заливали растворителем в соотношении 5 мл растворителя на 2 г образца. Образцы выстаивали в стеклянных пробирках в течение суток, затем надосадочную жидкость сливали и концентрировали путем выпаривания в стеклянных бюксах при комнатной



**Рис. 2.** Изотопный состав углерода почвенных липидов в почвах различных участков в пределах района исследования (1 – незагрязненные почвы междуречий; 2 – аллювиальные почвы; 3 – нефтезагрязненные почвы; 4 – почвы в пределах города).

температуре без доступа солнечных лучей. Концентрированный раствор помещали с помощью пипетки в оловянные капсулы и выпаривали до воздушно-сухого состояния.

Изотопный состав углерода липидных соединений определяли с помощью масс-спектрометрии. Определения выполняли в изотопной лаборатории географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова на масс-спектрометре Delta-V Plus со стандартной опцией элемент-анализатор EA 1112 HT O/H-N/C. Для измерений использовали международные стандарты IAEA-CH-3, IAEA-CH-6, IAEA-600 и USGS-24. Точность измерений  $\delta^{13}\text{C}$  на приборе составила  $\pm 0.2\%$ .

## РЕЗУЛЬТАТЫ

**Значения  $\delta^{13}\text{C}$  в почвенных липидах.** Среднее значение  $\delta^{13}\text{C}$  почвенных липидов во всех изученных образцах равно  $-28.4\%$ . Минимальная величина  $\delta^{13}\text{C}$  составляет  $-31.3\%$ , максимальная –  $-24.4\%$ .

Исследуемые почвы территориально были разделены на 4 группы: 1) незагрязненные почвы участков нефтяных месторождений на междуречьях (в том числе сельскохозяйственных); 2) загрязненные нефтью почвы (с визуальными признаками загрязнения); 3) аллювиальные почвы долины р. Медведица; 4) почвы г. Жирновск (рис. 1).

В незагрязненных черноземах и агрочерноземах на территории месторождения среднее значение  $\delta^{13}\text{C}$  почвенных липидов на глубине 0–10 см

равно  $-28.1\%$ , в серогумусовых и темногумусовых почвах –  $-29.2\%$ . В этой группе почв наблюдаются наименее отрицательные величины  $\delta^{13}\text{C}$ . В частности, максимальная величина ( $-26.9\%$ ) для всей выборки отмечена в сильнопреобразованной почве (агроземе) (рис. 2). На глубине 10–40 см этих почв средняя величина равна  $-28.2\%$ , 40–80 см –  $-28.6\%$ , 80–120 см –  $-26.8\%$ , более 120 см –  $-26.8\%$  (рис. 3). Таким образом, для данных почв характерно незначительное утяжеление изотопного состава почвенных липидов с глубиной.

В верхних горизонтах нефтезагрязненных почв различных типов изотопный состав углерода почвенных липидов варьирует слабо, в среднем значения  $\delta^{13}\text{C}$  равны  $-29.4\%$ , что соответствует среднему изотопному составу нефти Волгоградской области [1]. Таким образом, при нефтяном загрязнении изотопный состав углерода почвенных липидов становится близок к изотопному составу нефти. На глубине ( $>40$  см) значения  $\delta^{13}\text{C}$  колеблются в более широком диапазоне, от  $-24.4$  до  $-27.5\%$ . При этом значимые различия между загрязненными и незагрязненными почвами проявляются только в случае сильного загрязнения. В случае следового загрязнения различия сглаживаются.

В пределах урбанизированной территории средний изотопный состав углерода почвенных липидов в приповерхностных горизонтах серогумусовых почв составляет  $-28.6\%$ , в аллювиальных городских почвах  $-30.4\%$ . Таким образом, липиды в почвах, расположенных в черте города, имеют бо-

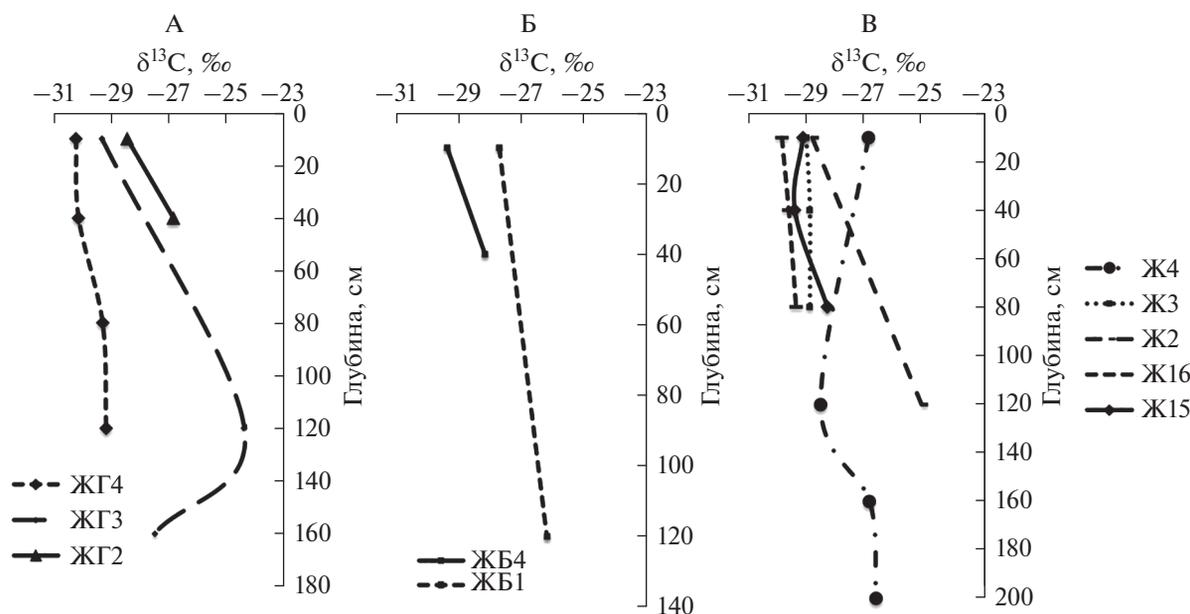


Рис. 3. Изменение изотопного состава углерода почвенных липидов по глубине на трех ключевых участках в районе Жирновского и Бахметьевского нефтегазовых месторождений.

лее легкий изотопный состав, чем вне города на незагрязненных участках месторождения.

В аллювиальных почвах долины р. Медведица изотопный состав углерода липидов в среднем составляет  $-29.6\text{‰}$  в приповерхностных горизонтах, то есть существенно более легкий по сравнению с почвами междуречий. Разброс значений в приповерхностных горизонтах различных опробованных аллювиальных почв составляет  $3.6\text{‰}$  (от  $-27.7$  до  $-31.3\text{‰}$ ). В аллювиальных почвах вертикальной дифференциации исследуемых показателей практически не наблюдается (величины  $\delta^{13}\text{C}$   $-29.6\text{‰}$ – $-29.4\text{‰}$ ).

### ОБСУЖДЕНИЕ

Изменение значений изотопного состава углерода липидов в почвах изученной территории определяются тремя основными факторами: фоновой неоднородностью, связанной, в первую очередь, с изотопным составом растительности; наличием нефтяного загрязнения; влиянием городской инфраструктуры (рис. 4, табл. 1).

Более тяжелый изотопный состав углерода липидов черноземов и агрочерноземов по сравнению с другими почвами (серогумусовыми, аллювиальными), вероятно, связан с формированием их в более сухих условиях. Органический углерод поступает в почвы, главным образом, из растительных источников. Таким образом, изотопный состав органического углерода в верхних горизонтах почв во многом зависит от изотопного состава атмосферного углерода. Согласно работе [18], изотопный состав углерода растений (величина  $\delta^{13}\text{C}$ )

прямо пропорционален скорости ассимиляции углерода растениями и обратно пропорционален их устьичной проводимости. Чем больше влажность местообитания растения, тем выше устьичная проводимость растений и тем больше эффект изотопного фракционирования, то есть тем более отрицательными становятся значения изотопного состава углерода растений, и, вслед за этим, почв. В результате приуроченные к более сухим местообитаниям растения будут иметь более тяжелый изотопный состав углерода [9, 24]. Тенденция к уменьшению величин  $\delta^{13}\text{C}$  с увеличением увлажнения наблюдается как в локальном, так и в глобальном масштабе, как это показано в работах [17, 25].

Естественная вариабельность изотопного состава почвенных липидов осложняется влиянием нефтяного загрязнения. В пределах исследованной территории нефтезагрязненные почвы характеризуются более низкими значениями  $\delta^{13}\text{C}$  по сравнению с фоном (обычно на  $1\text{‰}$ ), поскольку изотопный состав углерода нефти более легкий [3].

Пониженные значения  $\delta^{13}\text{C}$  в почвах в черте города (на парковой территории и на производственной площадке в районе бывшей транспортной зоны) величины  $\delta^{13}\text{C}$  находятся в пределах  $-29$ ,  $-30\text{‰}$  по сравнению с почвами незагрязненной территории месторождения можно объяснить меньшими значениями  $\delta^{13}\text{C}$  атмосферного  $\text{CO}_2$  над городом по сравнению с фоном. Это объясняется использованием органического топлива для отопления и транспорта, в результате чего образуется более легкий по сравнению с атмосферным  $\text{CO}_2$  [25].

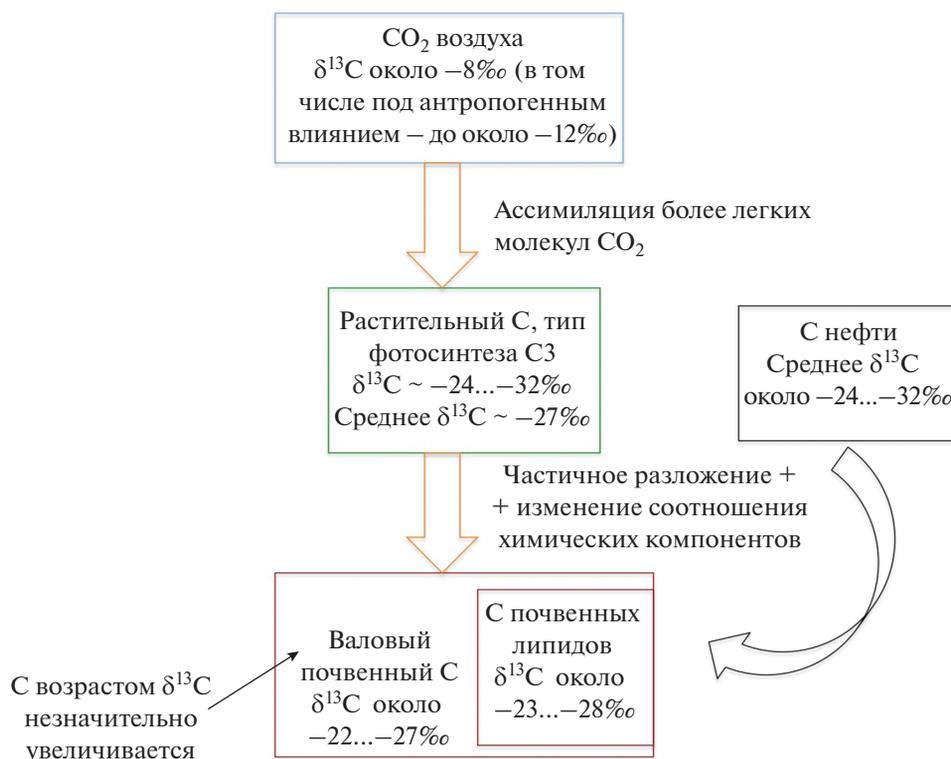


Рис. 4. Принципиальная схема формирования изотопного состава почвенных липидов на территории Жирновского и Бахметьевского нефтегазовых месторождений (составлена с учетом работ [3, 4, 8, 26]).

На территории Жирновского и Бахметьевского нефтегазовых месторождений разница  $\delta^{13}\text{C}$  почвенных липидов между глубинными и приповерхностными горизонтами составляет 2.7‰. Увеличение значений  $\delta^{13}\text{C}$  с глубиной почв обнаружено в большинстве исследованных точек на территории Жирновского и Бахметьевского нефтегазовых месторождений, что является обычным распределением изотопного состава органического углерода почв [4]. С глубиной и увеличением возраста органического вещества изотопный состав углерода почвенных липидов обычно утяжеляется [16, 26] из-за процессов микробиологического разложения органических остатков. Дамбаев с соавт. [4] показывают, что с глубиной значения  $\delta^{13}\text{C}$  валового углерода увеличиваются на 1–2‰. Однако это утяжеление с глубиной нарушается в различных почвах с признаками нефтяного загрязнения: агрозем текстурно-карбонатный, территория Жирновского промысла, аллювиальная дерновая почва, территория Жирновского промысла, серогумусовая артистратифицированная почва, территория г. Жирновск и др. Вероятно, поверхностное и глубинное нефтяное загрязнение обуславливает скачкообразный характер вертикального распределения изотопного состава углерода почвенных липидов, из-за которого на различных глубинах возникают более низкие величины  $\delta^{13}\text{C}$  (–29.4‰ при среднем –28.4‰).

Таким образом, в данных условиях влияние города и нефтяного загрязнения накладывается на естественную неоднородность изотопного состава. Природная вариабельность подчиняется закономерности: более сухой ландшафт — более тяжелый изотопный состав. В результате нефтяного загрязнения формируется слабодифференцированный по профилю изотопный состав. В результате городского влияния естественные значения смещаются в “легкую” сторону за счет поступления более изотопно легкого CO<sub>2</sub> из антропогенных источников. Суммарное влияние всех факторов отражается как в территориальном, так и в профильном почвенном распределении значений  $\delta^{13}\text{C}$ . При этом диапазоны изотопного состава липидов в аллювиальных почвах, в городских почвах и в нефтезагрязненных почвах частично перекрываются, однако в каждом случае это объясняется отдельным набором факторов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В пределах исследованной территории Жирновского и Бахметьевского нефтегазовых месторождений и г. Жирновск выделяются участки с различными вариантами землепользования, для которых проявляются определенные различия в изотопном составе углерода почвенных липидов.

Установлен более тяжелый изотопно-углеродный состав почв междуречий: черноземов и агро-черноземов ( $-26.9...-29.2\%$ ) — по сравнению с аллювиальными ( $-29.4...-31.3\%$ ) почвами. Разница составляет  $1.5\%$ . Утяжеление изотопного состава происходит благодаря более эффективному водопотреблению и использованию  $\text{CO}_2$  растениями, приуроченными к сухим местообитаниям.

При нефтяном загрязнении изотопный состав углерода почвенных липидов становится более легким ( $-29.3...-29.8\%$ ), поскольку изотопный состав нефти на территории исследования легче, чем изотопный состав углерода почв ( $-28$  и  $-29\%$  соответственно).

Влияние, оказываемое транспортом и инфраструктурой города, выражается в более легком изотопном составе углерода почвенных липидов (разница составляет  $-1.3\%$ ). Меньшие величины  $\delta^{13}\text{C}$  ( $-28.4...-30.6\%$ ) возникают, предположительно, из-за локального уменьшения  $\delta^{13}\text{C}$  атмосферного углекислого газа, которое, в свою очередь, происходит из-за сжигания органического топлива (различие изотопного состава углерода между чистым воздухом и непосредственно выбросами составляет до  $20\%$ ) [24].

#### БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы благодарны сотрудникам кафедры геохимии ландшафтов и географии почв географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова Н.И. Хлыниной и Е.В. Терской за помощь в лабораторных и полевых работах.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке РФФ (№ 19-17-00126 — анализ стабильных изотопов, № 14-17-00193 — полевые работы и № 19-77-30004 — исследование липидов) и РФФИ (18-05-60272 — обобщение данных).

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев Ф.А., Лебедев В.С., Овсянников В.М. Изотопный состав углерода газов биохимического происхождения. М.: Недра, 1973. 89 с.
2. Брылев В.А., Рябинина Н.О. Физико-географическое (ландшафтное) районирование Волгоградской области // Стрелен: научный ежегодник. 2001. № 2. С. 12–23.
3. Галимов Э.М. Геохимия стабильных изотопов углерода. М.: Недра, 1968. 225 с.
4. Дамбаев В.Б., Банзаракцаева Т.Г., Буянтуева Л.Б., Намсараев Б.Б., Зякун А.М. Изотопные вариации углерода растительности и почв степных пастбищ внутренней Азии // География и природные ресурсы. 2016. № 2. С. 118–124.
5. Макаров М.И., Малышева Т.И., Гончаров А.А., Тунов А.В. Изотопный состав углерода гумусовых кислот дерново-подзолистых почв и черноземов // Почвоведение. 2020. № 4. С. 414–420. <https://doi.org/10.31857/S0032180X20040097>
6. Моргунов Е.Г., Ковда И.В., Рысков Я.Г., Олейник С.А. Возможности и проблемы использования методов геохимии стабильных изотопов углерода в почвенных исследованиях (обзор литературы) // Почвоведение. 2008. № 3. С. 299–310.
7. Шураева Н.В., Рябинина Н.О. Ландшафтно-экологические условия Жирновского района Волгоградской области // Вопросы степеведения. 2013. Т. 10. С. 127–131.
8. Aguilera J., Whigham L.D. Using the  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  carbon isotope ratio to characterise the emission sources of airborne particulate matter: a review of literature // Isotopes in environmental and health studies. 2018. V. 54. № 6. P. 573–587.
9. Andrushevich V.E., Engel M.H., Zumberge J.E. Effects of paleolatitude on the stable carbon isotope composition of crude oils // Geology. 2000. V. 28. № 9. P. 847–850.
10. Balesdent J., Wagner G.H., Mariotti A. Soil organic matter turnover in long-term field experiments as revealed by carbon-13 natural abundance // Soil Sci. Soc. Am. J. 1988. V. 52. № 1. P. 118–124.
11. Čada V., Šantrůčková H., Šantrůček J., Kubištová L., Seedre M., Svoboda M. Complex physiological response of Norway Spruce to atmospheric pollution—Decreased carbon isotope discrimination and unchanged tree biomass increment // Frontiers in plant science. 2016. V. 7. P. 805.
12. Canuel E.A., Freeman K.H., Wakeham S.G. Isotopic compositions of lipid biomarker compounds in estuarine plants and surface sediments // Limnology and Oceanography. 1997. V. 42. № 7. P. 1570–1583.
13. Degens E.T. Biogeochemistry of stable carbon isotopes // Organic geochemistry. Berlin: Springer, 1969. P. 304–329.
14. Diefendorf A.F., Mueller K.E., Wing S.L., Koch P.L., Freeman K.H. Global patterns in leaf  $^{13}\text{C}$  discrimination and implications for studies of past and future climate // Proceedings of the National Academy of Sciences. 2010. V. 107. № 13. P. 5738–5743.
15. Diefendorf A.F., Freimuth E.J. Extracting the most from terrestrial plant-derived n-alkyl lipids and their carbon isotopes from the sedimentary record: A review // Organic Geochem. 2017. V. 103. P. 1–21.
16. Dinel H., Schnitzer M., Mehuys G.R. Soil lipids: origin, nature, content, decomposition, and effect on soil physical properties // Soil Biochem. 1990. V. 6. P. 397–429.
17. Fernandez-Cortés A., Perez-Lopez R., Cuezva S., Calaforra J.M., Cañaveras J.C., Sanchez-Moral S. Geochemical Fingerprinting of Rising Deep Endogenous Gases in an Active Hypogenic Karst System // Geofluids. 2018. V. 2018. P. 1–19.
18. Francey R.J., Farquhar G.D. An explanation of  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  variations in tree rings // Nature. 1982. V. 297. № 5861. P. 28–31.

19. *Gentile N., Siegwolf R.T., Esseiva P., Doyle S., Zollinger K., Delemont O.* Isotope ratio mass spectrometry as a tool for source inference in forensic science: a critical review // *Forensic science international*. 2015. V. 251. P. 139–158.
20. *Liang M.C., Mahata S., Laskar A.H., Bhattacharya S.K.* Spatiotemporal variability of oxygen isotope anomaly in near surface air CO<sub>2</sub> over urban, semi-urban and ocean areas in and around Taiwan // *Aerosol and Air Quality Research*. 2016. V. 17. № 3. P. 706–720.
21. *Lichtfouse E., Dou S., Girardin C., Grably M., Balesdent J., Béhar F., Vandenbroucke M.* Unexpected <sup>13</sup>C-enrichment of organic components from wheat crop soils: evidence for the *in situ* origin of soil organic matter // *Organic Geochem*. 1995. V. 23. № 9. P. 865–868.
22. *Lichtfouse E., Lichtfouse M., Jaffrezic A.* δ<sup>13</sup>C values of grasses as a novel indicator of pollution by fossil-fuel-derived greenhouse gas CO<sub>2</sub> in urban areas // *Environ Sci. Technol*. 2003. V. 37. P. 87–89
23. *Natelhoffer K.J., Fry B.* Controls on natural nitrogen-15 and carbon-13 abundances in forest soil organic matter // *Soil Sci. Soc. Am. J.* 1988. V. 52. № 6. P. 1633–1640.
24. *Pataki D.E., Randerson J.T., Wang W., Herzenach M., Grulke N.E.* The carbon isotope composition of plants and soils as biomarkers of pollution // *Isoscapes*. Springer, Dordrecht, 2010. P. 407–423.
25. *Rao Z., Guo W., Cao J., Shi F., Jiang H., Li C.* Relationship between the stable carbon isotopic composition of modern plants and surface soils and climate: a global review // *Earth-Sci. Rev.* 2017. V. 165. P. 110–119.
26. *Smith B.N., Epstein S.* Two categories of <sup>13</sup>C/<sup>12</sup>C ratios for higher plants // *Plant physiology*. 1971. V. 47. № 3. P. 380–384.
27. *Wang Y., Liang J., Wang J., Gao S.* Combining stable carbon isotope analysis and petroleum-fingerprinting to evaluate petroleum contamination in the Yanchang oilfield located on loess plateau in China // *Environ. Sci. Poll. Res.* 2018. V. 25. № 3. P. 2830–2841.

### Isotopic Composition of Carbon in Soil Lipids in the Area of Oil and Gas Extraction, Volgograd Oblast

A. D. Belik<sup>1, \*</sup>, Yu. K. Vasil'chuk<sup>1</sup>, A. N. Gennadiev<sup>1</sup>, N. A. Budantseva<sup>1</sup>,  
A. P. Zhidkin<sup>2</sup>, R. G. Kovach<sup>1</sup>, and T. S. Koshovskii<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Moscow State University, Moscow, 119991 Russia*

<sup>2</sup>*Dokuchaev Soil Science Institute, Moscow, 119017 Russia*

\*e-mail: ms.anna.belik@gmail.com

We analysed information on the carbon isotope composition of soil lipids in the soils of the Zhirmovsky and Bakhmetyevsky oil and gas fields in the Medveditsa river basin, Volgograd region. Based on these data, oil industrial and atmospheric pollution was described. Variations in the isotopic composition are determined by both anthropogenic factors and the heterogeneity of natural conditions. Thus, the carbon isotopic composition of lipids on the interfluvial soils (chernozems) is heavier (–26.9...–29.2‰) than alluvial soils (–29.4...–31.3‰), due to differences in moistening conditions and temperature conditions. Oil pollution is expressed in a lighter isotopic composition (–29.3...–29.8‰), since the carbon isotopic composition of oil is generally slightly lighter (–28.4...–30.6‰) than the isotopic composition of unpolluted soils. Urban and transport infrastructure facilitates the isotopic composition of atmospheric CO<sub>2</sub>, thus affecting the δ<sup>13</sup>C values of plant and soil masses.

*Keywords:* steppe, oil pollution, carbon isotopes, anthropogenic influence, Calcic Chernozems

УДК 631.41.577.1:541

## СТРУКТУРИРОВАНИЕ ПОЧВ В ПРИСУТСТВИИ ИНТЕРПОЛИМЕРНОГО КОМПЛЕКСА ХИТОЗАН–ПОЛИАКРИЛОВАЯ КИСЛОТА

© 2020 г. Л. К. Оразжанова<sup>а</sup>, Ж. С. Касымова<sup>а, \*</sup>, Б. Х. Мусабаева<sup>а</sup>, А. Н. Кливенко<sup>а</sup><sup>а</sup>Государственный университет имени Шакарима города Семей, ул. Глинки, 20а, Семей, 071400 Казахстан

\*e-mail: kasymova-z@mail.ru

Поступила в редакцию 01.04.2020 г.

После доработки 17.04.2020 г.

Принята к публикации 27.07.2020 г.

Представлены результаты исследования нового структурообразователя почвы – интерполимерного комплекса из биополимера хитозана и синтетического полимера полиакриловой кислоты, который впервые использован для закрепления поверхностного слоя светло-каштановой почвы Восточно-Казахстанской области. Интерполимерный комплекс получен методом смешения эквимольных растворов полимеров. Физико-химическими методами установлен состав комплекса [хитозан] : [полиакриловая кислота] = 1 : 9. Механическая прочность пленки интерполимерного комплекса оказалась больше по сравнению с пленками отдельных полимеров. При внесении интерполимерного комплекса на поверхность почвы двухрастворным способом наблюдается значительное улучшение структуры и противодефляционной стойкости почвы. Образовавшиеся при этом почвенные структураты проявляют выраженную устойчивость к водной эрозии, которая составила около 99%. Полученные результаты свидетельствуют о возможности применения интерполимерных комплексов для оструктурирования и повышения противоэрозионных свойств деградированных почв.

*Ключевые слова:* эрозия почв, структура почвы, светло-каштановая почва (Kastanozems), интерполимерный комплекс, полиэлектролит

DOI: 10.31857/S0032180X20120096

### ВВЕДЕНИЕ

Физическая деградация почвы и, как следствие, нарушение ее плодородия является одной из глобальных проблем современной экологии почв. В настоящее время главный и повсеместно действующий фактор почвенной деградации – ветровая и водная эрозии, в результате которых происходит разрушение и снос верхних, наиболее агрономически ценных агрегатов и плодородных горизонтов почвы, ухудшаются ее значимые физические, микробиологические и водные свойства, уменьшается биогенность [25].

Одним из показателей, характеризующих устойчивость почвы к водной и ветровой эрозиям, является ее структура. Именно оструктуренность делает почву эрозионно-стойкими. Наиболее эрозионно-опасными считаются легкие бесструктурные почвы, которые характеризуются низким содержанием гумуса, ила и коллоидов [10].

В настоящее время под воздействием хозяйственной, агротехнической деятельности происходит трансформация структуры почвы и ее водно-физических свойств, что приводит к активизации эрозионных и деструктивных процессов. Разрушение плодородных земель вследствие деструктуризации почвенного покрова имеет огром-

ное практическое влияние и в условиях Республики Казахстан. На сегодняшний день 60% сельскохозяйственного земельного фонда Казахстана подверглись деградации и практически утратили плодородие [1]. Площадь дефлированных земель составляет 11.3% от общей площади сельскохозяйственных угодий, а подверженных водной эрозии – 2.3% [18].

В условиях прогрессирующих почворазрушающих процессов и техногенной экологической нагрузки на почвенную среду стабилизация почвенной структуры, повышение ее противоэрозионной стойкости и продуктивности являются актуальной и важной задачей почвоведения.

В мировой практике для закрепления поверхности эрозионно-, дефляционно-опасных земель, а также снижения эрозионных процессов и смыва почв успешно используются интерполимерные комплексы (ИПК) [16]. Современные достижения в области полимерного структурирования дисперсных систем позволяют рекомендовать ИПК в качестве эффективных структурообразователей почв. Структурирующее действие ИПК обусловлено высоким сродством его структурных фрагментов к частицам почвы, что обеспечивает их оптимальную адсорбцию на поверхности ча-

стиц почвы и связывающий эффект с образованием более крупных ветро- и водоустойчивых агрегатов.

Технология применения ИПК предполагает использование двух методов нанесения полимерных связующих: дождевания — одномоментное нанесение на поверхность почвы водно-солевых растворов ИПК с последующим вымыванием соли водой [33] и двухрастворный — водные растворы противоположно заряженных полиэлектролитов последовательно наносятся на поверхность почвы [7]. Независимо от метода внесения, в результате обработки почвы раствором ИПК на поверхности почвенных частиц образуется воздухо- и влагопроницаемая полимерно-почвенная корка, устойчивая к воздействию атмосферных явлений, ветропереносу и размывающему действию воды. Обработка поверхности ИПК улучшает макроструктурное состояние почвы, ее водные и воздушные режимы, а также способствует росту и развитию растительности и микробиоты. Закрепление поверхности слабоструктурных почв с помощью ИПК позволяет вводить в сельскохозяйственный оборот низкопродуктивные почвы.

На сегодняшний день в области структурирования почв полимерными композитами применяют ИПК с участием природных полимеров. Высокая агрегирующая способность, долгосрочность действия, нетоксичность, биосовместимость и биодegradуемость — главные преимущества биополимерных комплексов, которые выдвигают их на первый план среди закрепителей — структурообразователей почв.

Из большого разнообразия природных полимеров, используемых для решения агроэкологических и мелиоративных задач, интерес представляет природный полиэлектролит катионного типа — хитозан (ХТЗ). В мировой практике ХТЗ и его комплексы успешно используются в качестве структурообразователей почв для закрепления поверхности эрозионно- и дефляционно-опасных земель [11, 23, 27]. Однако, как показал анализ литературных источников, сведения об ИПК ХТЗ с полиакриловой кислотой (ПАК) и его использовании в качестве структурообразователей почв весьма ограничены [26, 32].

В данной работе для улучшения структуры поверхностного слоя слабоструктурной почвы, повышения ее противозерозионной стойкости, а также улучшения агрофизических свойств использовали ХТЗ в комплексе с анионным синтетическим протондонорным полимером — ПАК.

Цель работы — исследование закономерностей образования ИПК ХТЗ : ПАК, изучение его структурирующих свойств и противозерозионного действия при внесении на поверхность светло-каштановой почвы Восточно-Казахстанской области.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

**Отбор проб и агрохимический анализ почвы.** Объектом лабораторного исследования являлась солончаковатая светло-каштановая почва (Haplic Kastanozems (Loamic, Aric Endosalic)) сухостепной зоны Восточно-Казахстанской области. Климат области континентальный и засушливый. Среднегодовая температура 2.5–3°C, продолжительность теплого периода 200 дней, за год выпадает 250–300 мм осадков. На этих почвах при проведении мероприятий по накоплению и сохранению влаги и при внесении минеральных и органических удобрений возможно успешное выращивание широкого спектра культур, преимущественно зерновых (пшеница, кукуруза, ячмень).

Образец почвы отобрали из пахотного горизонта (Апах) на пахотном участке агрофирмы “Приречное”, расположенном на левом берегу р. Иртыш в 10 км от г. Семей (50°21' N, 80°25' E). Отбор точечных проб и пробоподготовку почвы проводили соответственно [15].

Анализ структуры почвы проводили методами сухого и мокрого просеивания [3].

*Расчет коэффициента структурности ( $K_{стр}$ )* [22] по данным сухого просеивания выполняли по формуле:

$$K_{стр} = \frac{\sum(10 - 0.25 \text{ мм})}{\sum(10 \text{ мм}, <0.25 \text{ мм})}, \quad (1)$$

где в числителе — масса агрегатов 10–0.25 мм, г; в знаменателе — масса агрегатов >10, <0.25 мм, г.

*Расчет комковатости почвы ( $K$ )* — показателя потенциальной ветроустойчивости поверхностного слоя почвы — проводили по данным сухого просеивания по формуле:

$$K = \frac{\sum(>1 \text{ мм})}{M}, \quad (2)$$

где в числителе — масса агрегатов >1 мм, г;  $M$  — масса навески, взятой для анализа, г [20].

*Критерий водоустойчивости агрегатов (АФИ, %)* рассчитывали по формуле:

$$АФИ = \left( \frac{A_1}{A_2} \right) \times 100, \quad (3)$$

где  $A_1, A_2$  — массы агрегатов 1–0.25 мм по результатам мокрого и сухого просеивания соответственно, г [2].

*Определение агрохимических показателей* почвы: гигроскопической влажности, влагоемкости, актуальной и обменной кислотности, водопроницаемости, содержания обменного фосфора и аммония, содержания гумуса — проводили в соответствии с [5].

**Исследование ИПК ХТЗ : ПАК.** Для синтеза ИПК использовали коммерчески доступные об-

разцы полимеров (Sigma-Aldrich, USA): ХТЗ высоковязкий из крабовых панцирей (Chitosan from crab shells highly viscous) и ПАК средневязкостный с молекулярной массой  $3.0 \times 10^6$  (Poly(acrylic acid)).

Согласно литературным данным, биологическая и физико-химическая активность ХТЗ определяется высокой концентрацией положительных зарядов на макроцепи ХТЗ с максимальной степенью деацетилирования (СД) от 70 до 90%. При этом СД играет решающую роль в адгезии ХТЗ на любой отрицательно заряженной поверхности (мембрана клетки, почвенные частицы) [17]. В нашем исследовании при максимальной СД возможно прочное комплексообразование между ХТЗ и ПАК за счет электростатического взаимодействия свободных положительно заряженных аминогрупп ХТЗ с отрицательно заряженными карбоксильными группами ПАК. В связи с этим у ХТЗ определяли СД.

*Определение СД* проводили методом потенциометрического титрования с использованием рН-метра Hanna Instruments (HI 2215 рН/ORP Meter, Romania). ХТЗ, растворенный в 0.1 М соляной кислоте, титровали 0.1 М гидроксидом натрия с шагом  $0.1 \text{ см}^3$ , измеряя рН раствора. По полученным данным построили график зависимости рН от объемов титранта гидроксида натрия, соответствующий точкам эквивалентности соляной кислоты и солянокислого ХТЗ. СД (%) вычисляли по формуле:

$$\text{СД} = \frac{203.2 \times 100}{\left[ \frac{42.0 + 1000 \times m_0}{(C_{\text{NaOH}} \times dV_{\text{NaOH}})} \right]}, \quad (4)$$

где  $m_0$  – масса навески ХТЗ, г;  $C_{\text{NaOH}}$  – точная концентрация раствора гидроксида натрия, моль/мл;  $dV_{\text{NaOH}}$  – объем раствора гидроксида натрия, пошедший на титрование аминогрупп, мл; 203.2, 42.0, 100, 1000 – пересчетные коэффициенты [13].

*Синтез ИПК* осуществляли методом смешения исходных макромолекулярных компонентов. Эквивалентные растворы исходных полимеров – кислоторастворимого ХТЗ (в 0.1 М растворе HCl) и ПАК смешивали в мольных соотношениях ХТЗ (HCl) : ПАК = 0 : 10, 1 : 9, 2 : 8, 3 : 7, 4 : 6, 5 : 5, 6 : 4, 7 : 3, 8 : 2, 9 : 1, 10 : 0 при комнатной температуре [11, 28].

*Структуру и состав ИПК ХТЗ : ПАК* изучали совокупностью физико-химических методов исследования [29]. Экспериментальные данные были представлены в виде графиков зависимости свойство–состав комплекса. Составы ИПК определяли по точкам перегиба или экстремумам на кривых.

*Кондуктометрическое исследование ИПК ХТЗ : ПАК* осуществляли путем измерения электропроводности растворов ИПК с помощью кондук-

тометра S230 Seven Compact Mettler Toledo (Switzerland).

*Заряд частиц ИПК* определяли методом динамического лазерного светорассеяния (ДЛС) с помощью прибора Zetasizer Nano ZS 90 (Malvern, UK). Из серии растворов ИПК отбирали по 0.5 мл, переносили в кювету и измеряли  $\zeta$ -потенциал.

*Турбидиметрическое исследование* состава ИПК осуществляли с помощью спектрофотометра UF Specord 210 PLUS (Germany). Растворы ИПК переносили в кюветы и измеряли оптическое светопропускание при длине волны 440 нм.

*ИК-спектры* полимеров и ИПК регистрировали на приборе ИК-Фурье спектрометр Cary 660 Agilent (USA), снабженном ATR-приставкой в области от 400 до  $4000 \text{ см}^{-1}$ .

*Исследования реологических свойств* растворов ИПК проводили на ротационном вискозиметре RheolabQC, AntonPaar (Austria). Растворы ИПК с концентрацией полимеров 0.01 М переносили в стакан реовискозиметра и проводили измерение динамической вязкости при скорости сдвига от 1 до  $100 \text{ с}^{-1}$  и 600 измерительных точках.

*Полимерные пленки* получали на полимерной подложке из растворов исходных полимеров и ИПК путем испарения растворителя при комнатной температуре и нормальном атмосферном давлении.

*Изучение механических характеристик* пленок проводили при комнатной температуре на приборе TAxT plus Texture analyzer (Stable Micro Systems, UK) в режиме сжатия с использованием P/5S со скоростью 0.1 мм/с.

### **Исследование противоэрозионной устойчивости почвы, обработанной ИПК**

*Обработку поверхностного слоя почвы* ИПК осуществляли двухрастворным способом путем последовательного нанесения разбавленных растворов полимеров по поверхности почвы при помощи пульверизатора. На поверхность почвы путем разбрызгивания наносили 0.01 М раствор ХТЗ (в 0.1 М HCl), после впитывания первого полимера на обрабатываемую почвенную поверхность равномерно разбрызгивали 0.01 М раствор ПАК. Растворы полимеров вносили в мольном соотношении [ХТЗ] : [ПАК] = 1 : 9 [8]. Для получения структуратов в чашку Петри насыпали фракцию почвы 0.25–0.5 мм слоем 1.5 см. Обработку почвы полимерами и ИПК проводили в следующих вариантах по три повторности:

1. Контроль (почва, обработанная дистиллированной водой).
2. Почва, обработанная кислоторастворимым ХТЗ (0.02% от массы воздушно-сухой почвы).

3. Почва, обработанная водорастворимым ПАК (0.01% от массы воздушно-сухой почвы).

4. Почва, обработанная ИПК (0.01% от массы воздушно-сухой почвы с мольным соотношением [ХТЗ] : [ПАК] = 1 : 9).

Полученные структураты высушивали при комнатной температуре в течение 3 сут, затем проводили испытания механической прочности с помощью прибора TAxT texture analyzer (StableMicroSystems, UK) в режиме сжатия со скоростью 0.01 мм/с с использованием насадки P5/S.

*Определение устойчивости к смыву водой почвенных структуратов*, образовавшихся в результате обработки почвы ИПК ХТЗ : ПАК, проводили по методике, описанной в работе Пановой с соавт. [30]. В данной работе авторы для исследования устойчивости верхнего слоя дерново-подзолистой почвы к водной эрозии наполнили чашки Петри 60 г почвы, просеянной через сито 1.5 мм и обработали по вариантам: 1) контроль; 2) 1% ИПК; 3) 1% гуминовой кислотой; 4) 1% полидиаллилдиметиламмоний хлоридом. Чашки Петри с пятидневными высохшими почвенно-полимерными пленками наклоняли на 15° и опрыскивали 175 мл воды. Смывные воды собирали в стеклянные сосуды и сравнивали мутность по вариантам. Одновременно остатки почвы в чашках Петри сушили и взвешивали для нахождения потерь от смыва водой. В нашем эксперименте чашки Петри наполняли навеской светло-каштановой почвы 50 г, пропущенной через сито с отверстиями  $d = 0.25$  мм, толщина почвенного слоя составила 0.5 см. Обработку почвы полимерами ХТЗ, ПАК и ИПК [ХТЗ] : [ПАК] проводили по выше указанным вариантам. Почву с полимерами и ИПК в чашках Петри оставляли высыхать в течение 5 дней. Далее проводили аналогичное испытание почвенных образцов на устойчивость к смыву водой.

*Расчет устойчивости (R, %) почвы к смыву* проводили по формуле:

$$R = \frac{m}{M} \times 100, \quad (5)$$

где  $m$  – масса оставшейся почвы после испытания, г;  $M$  – масса взятой навески почвы, г.

*Способность почвенных структуратов к самосборке* изучали до и после обработки почвы полимерами и ИПК [19]. Образец почвы пропускали через сито с диаметром отверстий 0.25 мм, 3–1 мм. Почвенные агрегаты 3–1 мм размельчали в ступке и пропускали через сито 0.25 мм (частицы агрегатов). В чашки Петри переносили по 20 г почвы и добавляли в каждую по 20 мл воды (контрольный вариант), ХТЗ, ПАК и ИПК. Высушивали на воздухе при комнатной температуре 20°С в течение двух дней. Таким же образом обрабатывали и высушивали почву, пропущенную вначале через сито 0.25 мм (свободные частицы).

Для разделения самособравшихся агрегатов и неплотно сцепленных почвенных частиц, почвенные навески из чашки Петри переносили в центрифужные пробирки, затем встряхивали на ротаторе LOIP LS-110 (Russia) в течение 90 мин при 25 об./мин, после чего почву переносили на сито 0.25 мм, просеивали и взвешивали оставшуюся на сите почву. Данное значение использовали для расчета их содержания в общей навеске.

Полученные самособравшиеся агрегаты переносили на предварительно увлажненное сито 0.25 мм и ждали, когда вода, удерживаемая между ячейками сита, увлажнит навеску агрегатов, затем сито с агрегатами погружали в воду на 10 мин. Далее агрегаты просеивали в воде, двигая сито вверх–вниз и влево–вправо по 10 раз. На сите оставались водоустойчивые агрегаты, способные к самосборке после механического разрушения. Полученные водоустойчивые агрегаты высушивали при температуре 105°С и взвешивали. Суспензию с прошедшими через сито частицами <0.25 мм высушивали и взвешивали.

Количество способных к самосборке агрегатов ( $\eta_c$ , %) рассчитывали согласно формуле:

$$\eta_c = \frac{m}{M} \times 100, \quad (6)$$

где  $m$  – масса самособравшихся агрегатов почвы, г;  $M$  – масса взятой навески почвы, г.

Количество водоустойчивых агрегатов, способных к самосборке ( $\eta_b$ , %) рассчитывали по формуле:

$$\eta_b = \frac{m}{M} \times 100, \quad (7)$$

где  $m$  – масса водоустойчивых самособравшихся агрегатов почвы, г;  $M$  – масса взятой навески почвы, г.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В нашем исследовании ИПК ХТЗ : ПАК впервые использован в качестве почвенного структурообразователя. В связи с этим на первом этапе необходимо было осуществить процесс получения ИПК ХТЗ : ПАК, изучить его структуру и определить состав.

Для характеристики количества реакционно-способных положительно заряженных аминогрупп в ХТЗ определили СД, ее среднее значение из трех параллельных измерений составило 71%:

$$СД = \frac{203.2 \times 100}{\frac{42.0 + 1000 \times 0.2}{(0.1 \times 8.5)}} = 71\%.$$

Из полученных результатов следует, что ХТЗ представляет собой катионный полиэлектролит. Катионная природа ХТЗ обуславливает способ-

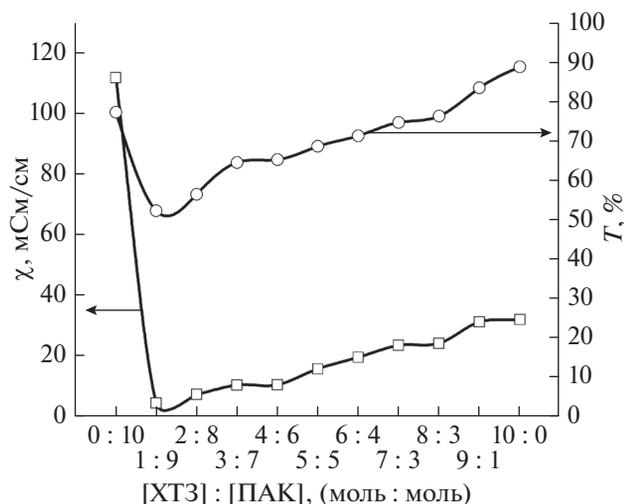


Рис. 1. Кривые кондуктометрического и турбидиметрического исследований комплексообразования в системе ХТЗ : ПАК.

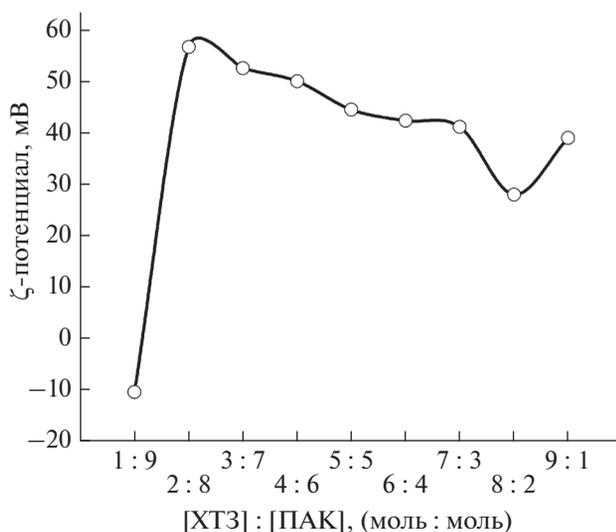


Рис. 2. Зависимость ζ-потенциала частиц ИПК от мольного соотношения в системе ХТЗ : ПАК.

ность полимера к взаимодействию с анионными полиэлектролитами, в том числе и с ПАК, с образованием ИПК.

Результаты физико-химических исследований структуры и состава ИПК ХТЗ : ПАК представлены на рис. 1–4.

Как видно из рис. 1, добавление раствора ПАК к раствору солянокислого ХТЗ сопровождается резким снижением электропроводности и оптического светопропускания растворов. На кривых наблюдается отклонение от аддитивности, что свидетельствует об образовании полимерного комплекса ХТЗ : ПАК. Положение экстремума на кривых соответствует нестехиометрическому

комплексу с составом  $n = \text{ХТЗ} : \text{ПАК} = 1 : 9$ . Обогащение ИПК ПАК может быть связано с подавлением диссоциации карбоксильных групп в сильноокислой среде (ниже собственной рН), создаваемой солянокислым раствором ХТЗ. Как известно, в кислой среде ПАК принимает свернутую конформацию и обладает склонностью к ассоциации [6, 14] вследствие возникновения межцепных водородных связей между карбоксильными группами ПАК в ИПК.

Данные кондуктометрии и турбидиметрии подтверждаются результатами ДЛС, гравиметрии, ИК-спектроскопии и реовискозиметрии.

На рис. 2 представлена зависимость ζ-потенциала от мольного соотношения полимерных составляющих. Видно, что при соотношении ХТЗ : ПАК = 1 : 9 ζ-потенциал достигает нулевого значения, что указывает на нейтрализацию положительного заряда ХТЗ отрицательным зарядом карбоксильной группы ПАК, и является свидетельством электростатического взаимодействия между молекулами поликатиона и полианиона, а также подтверждает кооперативный характер комплексообразования.

В ИК-спектре ХТЗ (рис. 3, кривая 1) имеются полосы поглощения, характерные для всех полисахаридов: 3000–3600 (колебания ОН-групп), 2900–2950 (колебания СН<sub>2</sub>-групп), 1651 см<sup>-1</sup> (колебания NH<sub>2</sub>-групп). В ИК-спектре ПАК (рис. 3, кривая 2) наблюдаются полосы поглощения в области 2880–2900 см<sup>-1</sup> (колебания СН-групп), а также в области 1610 и 1750 см<sup>-1</sup> обусловленные наличием СОСО-групп. В ИК-спектрах ИПК (рис. 3, кривая 3) наблюдается смещение колебаний карбоксильных групп в более низкочастотную область ( $\nu_{\text{C=O}}^{\text{sym}} 1590 \text{ см}^{-1}$ ,  $\nu_{\text{C=O}}^{\text{asym}} 1738 \text{ см}^{-1}$ ) и исчезновение колебаний аминогруппы (1651 см<sup>-1</sup>), что указывает на электростатическое взаимодействие NH<sub>2</sub>-групп ХТЗ и СООН-групп ПАК.

На рис. 4 представлены кривые напряжения сдвига от соотношения ХТЗ : ПАК. Видно, что наибольшая величина напряжения сдвига наблюдается в растворе ИПК при мольном соотношении ХТЗ : ПАК = 1 : 9, что объясняется высокой степенью ассоциации и интенсивностью межмолекулярных взаимодействий полимерных компонентов [9], которые приводят к росту прочности ассоциатов ИПК.

Совокупность результатов исследования позволяет сделать вывод о том, что электростатическое взаимодействие функциональных групп ХТЗ и ПАК приводит к образованию нестехиометрического полиэлектролитного комплекса ХТЗ : ПАК, стабилизированного преимущественно системой ион-ионных связей.

С целью дальнейшего применения ИПК ХТЗ : ПАК в качестве структурообразователей почв

изучены механические свойства полимерных пленок ХТЗ, ПАК и ИПК ХТЗ : ПАК. Значение модуля упругости полимерной пленки на основе ИПК ХТЗ : ПАК ( $6.21 \pm 0.02$ ) больше в  $\sim 1.5$  раза по сравнению с пленкой ПАК ( $4.07 \pm 0.03$ ) и в 3 раза — с пленкой ХТЗ ( $2.09 \pm 0.04$  Па), что демонстрирует повышенные механические свойства ИПК.

Следующим этапом исследования было изучение структурирующих свойств и противозерозионного действия ИПК ХТЗ : ПАК в отношении поверхностного слоя солончаковой светло-каштановой почвы Восточно-Казахстанской области. Солончаковая светло-каштановая почва пахотного горизонта характеризуется следующими агрохимическими показателями: легкий суглинистый гранулометрический состав (содержание физической глины 20%), оптимальная влагоемкость ( $34.5 \pm 0.5\%$ ) и удовлетворительная водоустойчивость почвенных агрегатов (40%), очень низкое содержание гумуса ( $0.75 \pm 0.03\%$ ), слабощелочная реакция почвенного раствора (рН 7.8), очень низкое содержание подвижного азота ( $10.2 \pm 0.5$  мг/кг), низкое содержание обменного фосфора ( $80.9 \pm 0.8$  мг/кг). Окраска верхнего горизонта почвы светло-бурая. Мощность гумусового горизонта 8–12 см.

Исследовано структурное состояние почвы до и после обработки ИПК ХТЗ : ПАК, результаты которого представлены в табл. 1.

Оценка гранулометрического состава пахотного горизонта исходной почвы проводилась в соответствии с агрономической классификацией Качинского [22]. Доля физической глины в исследуемой почве составляет 20%. Отсюда следует, что светло-каштановая почва Восточно-Казахстанской области относится к легкосуглинистой (почве степного почвообразования). Согласно [4], легкосуглинистые почвы характеризуются слабовыраженной структурой.

На основании результатов сухого просеивания значение  $K_{стр}$  составило 1.5. Согласно существующим критериям, структура почвы оценивается как хорошая [22]. В то же время расчет комковатости исследуемой почвы показал неустойчи-

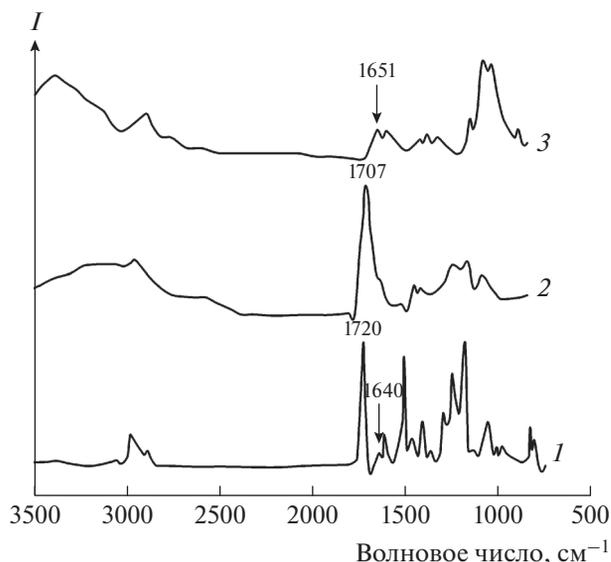


Рис. 3. ИК-спектры ПАК (1), ИПК ХТЗ : ПАК (2) и ХТЗ (3).

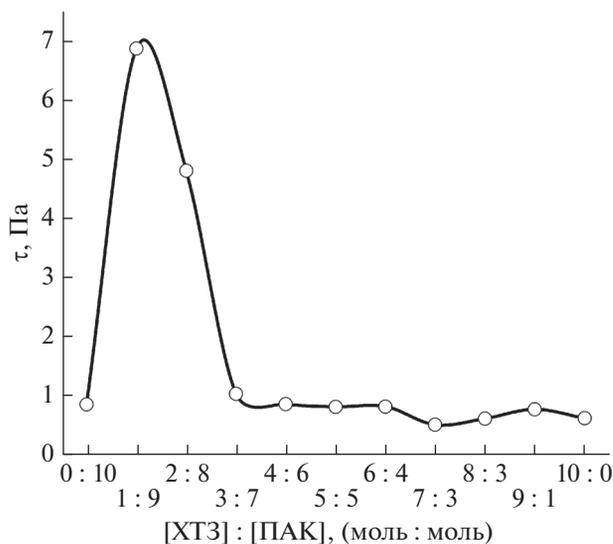


Рис. 4. Зависимость напряжения сдвига ( $\tau$ , Па) от отношения ХТЗ : ПАК.

Таблица 1. Структурное состояние светло-каштановой почвы Восточно-Казахстанской области до и после обработки ИПК ХТЗ : ПАК

Вариант	Содержание агрегатов, %					$K_{стр}$	K, %	АФИ, %
	воздушно-сухих			водоустойчивых				
	>10 мм	10–0.25 мм	<0.25 мм	>1 мм	>0.25 мм			
Контроль	$4.0 \pm 0.2$	$60.3 \pm 2.0$	$35.7 \pm 1.5$	$25.3 \pm 1.3$	$40.0 \pm 1.5$	1.5	29	73.6
ИПК	$6.7 \pm 0.4$	$89.0 \pm 1.5$	$4.3 \pm 0.2$	$78.7 \pm 2.0$	$90.7 \pm 2.5$	8.1	77	91.2

Примечание. Коэффициент вариации при определении содержания агрегатов не превышал 10%.

вость агрегатов  $>1$  мм в слое 0–5 см почвы к воздействию ветра. Значение  $K$  составило 29% [20].

Оценку водоустойчивости почвенных агрегатов производили по критерию АФИ и по результатам мокрого просеивания. Критерий АФИ контрольного образца почвы составил 73.6%, суммарное количество агрегатов  $>0.25$  мм – 40%. Согласно полученным результатам, водоустойчивость агрегатов является удовлетворительной.

Таким образом, результаты определения структурного состояния пахотного слоя светло-каштановой почвы Восточно-Казахстанской области демонстрируют ее слабую оструктуренность и подверженность к деградациям.

Внесение на поверхность почвы раствора ИПК ХТЗ : ПАК привело к выраженному агрегированию почвенных частиц с последующим перераспределением фракций по размерам в сторону увеличения содержания агрономически ценных агрегатов размером  $>1$  мм (табл. 1). Так, содержание воздушно-сухой фракции  $<0.25$  мм уменьшилось в 8 раз (с 35.7 до 4.3%), а содержание макро- ( $>10$  мм) и мезоагрегатов (0.25–10 мм) увеличилось в  $\sim 1.5$  раза (с 4.0 до 6.7% для макроагрегатов и с 60.3 до 89.0% для мезоагрегатов).  $K_{стр}$  почвы, обработанной ИПК, возрос в 5 раз. Значение  $K$  увеличилось более чем в 2.5 раза. Наблюдалось и увеличение водоустойчивых агрегатов. Так, количество водоустойчивых агрегатов  $>0.25$  мм увеличилось в 2 раза, критерий АФИ возрос на 17.6%.

Полимерная стабилизация почв под действием ИПК может быть следствием одновременно протекающих процессов: коагуляции, адсорбции, действия вторичных валентностей [21]. Основной вклад из этих процессов вносит адсорбция ИПК на поверхности дисперсных частиц. Процесс адсорбции может происходить за счет образования водородных и ионных связей между свободными функциональными группами ИПК и активными участками поверхности почвенных частиц. При этом макромолекулы ИПК способны изменять свое конформационное состояние, приводящее к перераспределению гидрофильных и гидрофобных участков при внесении ИПК на поверхность почвы. В результате конформационных превращений гидрофильные положительно заряженные сегменты ИПК притягиваются к отрицательно заряженным участкам поверхности частиц дисперсной фазы (например, включения кремнезема, на поверхности частиц которого находятся ОН-группы), напротив, отрицательно заряженные сегменты притягиваются к положительно заряженным участкам поверхности дисперсных частиц, а гидрофобные сегменты ИПК прилипают к гидрофобным поверхностям. Таким образом, осуществляется самонастройка ИПК, в результате которой достигается оптимальное вза-

имодействие ИПК с дисперсными коллоидными системами [7, 24].

Обработка поверхности почвы ИПК привела к следующим изменениям агрохимических показателей: увеличению содержания подвижного азота (на 3.0) и обменного фосфора (на 0.3), росту влагоемкости (на 1.2) и водоустойчивости (на 50.7%). Увеличение содержания макроэлементов может быть связано для аммонийного азота с наличием аминогрупп в макромолекулах ХТЗ – резерва азотного питания, для обменного фосфора – с образованием нерастворимого ортофосфата кальция в щелочной среде (рН 7.8), а также насыщением и удерживанием азота и фосфора водоустойчивыми агрегатами в результате склеивания почвенных частиц полимерным комплексом. Улучшение водных свойств почвы может быть связано с выраженной влагоудерживающей способностью ИПК на основе ХТЗ. Как известно, ХТЗ обладает свойством образовывать пленку, которая препятствует испарению влаги из порового пространства почвы [23].

Таким образом, внесение в почву ИПК улучшает водно-физические свойства почвы, увеличивает содержание азота и фосфора, что положительно влияет на рост и развитие сельскохозяйственных культур.

Исследована устойчивость к смыву почвенных структуратов, образованных в результате обработки почвы индивидуальными полимерами – ХТЗ, ПАК и ИПК ХТЗ : ПАК. Максимальный смыв почвенных частиц водой, как и мутность смывных вод, наблюдаются в чашке с контролем. Потери почвы в случае смыва водой необработанной почвы составили  $9.6 \pm 1.0$  г (19.1%). В чашке с почвой, обработанной водным раствором ПАК, потери почвы –  $1.4 \pm 0.3$  г (2.9%). Смыв водой почвы, обработанной раствором ПАК, может быть вызван одинаковым зарядом макромолекул ПАК и частиц почвы, что приводит к дезагрегации почвенных частиц и их неустойчивости к действию воды [31]. В образце почвы, обработанной ХТЗ, смываемость почвы и мутность смывных вод меньшая в сравнении с контролем. Потери почвы составляют  $0.6 \pm 0.1$  г (1.3%). Повышение эрозионной устойчивости почвы, обработанной ХТЗ, можно объяснить образованием ионной связи между положительно заряженными участками биополимера и отрицательно заряженными частицами почвы, что приводит к агрегации почвенных частиц и повышает их устойчивость к действию воды. Образец почвы, обработанной ИПК ХТЗ : ПАК, сохраняет свою поверхностную целостность по отношению к размывающему действию воды, дефектов в поверхностном слое почвы и потери почвы практически не наблюдаются. Потери почвы, обработанной ИПК ХТЗ : ПАК, составили  $0.5 \pm 0.1$  г (1.1%), а доля устойчивости

**Таблица 2.** Способность свободных частиц и частиц агрегатов светло-каштановой почвы к самосборке

Вариант обработки почвы	Доза, % от массы воздушно-сухой почвы	Самособравшиеся агрегаты, %	
		из свободных частиц <0.25 мм	из частиц агрегатов 3–1 мм
Контроль	0	18.2 ± 0.6 (6)	31.5 ± 2.0 (10)
ПАК	0.01	20.9 ± 0.6 (5)	66.8 ± 3.5 (9)
ХТЗ	0.02	62.6 ± 1.0 (3)	67.1 ± 4.0 (10)
ИПК	0.01	73.1 ± 1.8 (4)	67.2 ± 3.7 (10)
НСР <sub>0.05</sub>		1.5	2.5

Примечание. В скобках представлен коэффициент вариации, %.

почвы к действию водной эрозии – 99%. Таким образом, обработка почвы растворами индивидуальных полимеров и ИПК ХТЗ : ПАК способствует закреплению поверхности почвы, предотвращая смыв плодородного слоя и нарушение почвенной структуры. По противоэрозионной эффективности полимерные структурообразователи располагаются в ряду: ИПК ХТЗ : ПАК > ХТЗ > ПАК.

Изучено влияние ИПК на способность почвенных агрегатов самоагрегироваться. Способность к самосборке является одним из важных показателей, характеризующих структуру почвы. Самособирающиеся агрегаты сохраняют органическое вещество и улучшают структуру почвы. Следствием снижения способности почвенных частиц к самосборке является ухудшение физико-химических свойств почвы и подавление микробиологических процессов [12].

В табл. 2 приведены результаты самосборки агрегатов почвы естественного сложения <0.25 мм (свободных частиц – СЧ) и из предварительно разрушенных структурных отдельностей 3–1 мм (частиц агрегатов – ЧА), обработанных полимерами и ИПК, после увлажнения–высушивания.

Согласно табл. 2, в необработанной почве частицы агрегатов, полученные с помощью механического разрушения агрегатов 3–1 мм, обладают хорошо выраженной способностью самоагрегироваться. Так, количество самособравшихся агрегатов из СЧ составляет 18.2, в то время как из ЧА – 31.5%. Внесение в почву полимеров и ИПК усиливает способность к самосборке и СЧ, и ЧА. Обработка СЧ раствором ПАК увеличила самосборку на 2.7, ХТЗ – 44.4, ИПК ХТЗ : ПАК – 54.9 по сравнению с контролем (18.2%). Повышение самосборки ЧА в сравнении с контролем (31.5) составило 35.3 (обработка раствором ПАК), 35.6 (обработка раствором ХТЗ) и 35.7% (обработка ИПК ХТЗ : ПАК). Важно отметить, что внесение на поверхность почвы растворов полимеров и ИПК значительно повышает способность бесструктурных частиц самопроизвольно собираться в агрегаты до размеров >0.25 мм. Тем самым улуч-

шается структура почвы и усиливается ее способность противостоять действиям эрозионных процессов.

Внесение на поверхность почвы полимеров также увеличивает водоустойчивость самособравшихся агрегатов. Обработка СЧ раствором ХТЗ увеличила водоустойчивость на 18, ПАК и ИПК – на 20 в сравнении с контролем (5%). Повышение водоустойчивости для ЧА составляет 30 (обработка раствором ПАК), 36 (раствором ХТЗ) и 37 (ИПК) по сравнению с контролем (25%).

Следовательно, использование ХТЗ, ПАК и ИПК ХТЗ : ПАК усиливает самоагрегирование почвенных агрегатов и увеличивает их водоустойчивость.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ результатов исследования демонстрирует возможность использования ИПК ХТЗ : ПАК для агрегирования бесструктурных пахотных светло-каштановых почв, предрасположенных к действию ветровой и водной эрозии. Полимерное структурирование почв с помощью ИПК позволяет существенно улучшить почвенную структуру, придать почве противоэрозионную стойкость, улучшить агрохимические показатели почвы, и, как следствие, повысить ее плодородие. Результаты применения ИПК в качестве структурообразователей почв представляют интерес для дальнейшего изучения их эффективности на различных сельскохозяйственных почвах и создания благоприятных условий роста, развития и повышения урожайности растительной продукции.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках гранта AP05134681 Министерства образования и науки Республики Казахстан.

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Байшанова А.Е., Кедельбаев Б.Ш. Проблемы деградации почв. Анализ современного состояния плодородия орошаемых почв Республики Казахстан // Научное обозрение. Биологические науки. 2016. № 2. С. 5–13.
2. Бойцова Л.В. Структурный состав дерново-подзолистых почв различного землепользования // Агрофизика. 2017. № 1. С. 10–19.
3. Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А. Методы исследования физических свойств почв. М.: Агропромиздат, 1986. 416 с.
4. Воеводина Л.А. Структура почвы и факторы, изменяющие ее при орошении // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации. 2016. № 1(21). С. 134–154.
5. Воробьева Л.А. Химический анализ почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1998. 272 с.
6. Изумрудов В.А., Касаикин В.А., Ермакова Л.Н., Зезин А.Б. Исследование водорастворимых полиэлектролитных комплексов неэквивалентного состава // Высокомолекулярные соединения. А. 1978. Т. 20(2). С. 400–406.
7. Изумрудов В.А., Мусабаева Б.Х., Касымова Ж.С., Кливенко А.Н., Оразжанова Л.К. Интерполиэлектродитные комплексы: достижения и перспективы // Успехи химии. 2019. Т. 88(10). С. 1046–1062.
8. Кабанов В.А., Зезин А.Б., Касаикин В.А., Ярославов А.А., Топчиев Д.А. Полиэлектролиты в решении экологических проблем // Успехи химии. 1991. Т. 60(3). С. 595–601.
9. Кабанов В.А. Полиэлектролитные комплексы в растворе и в конденсированной фазе // Успехи химии. 2005. Т. 74(1). С. 5–23.
10. Карпачевский Л.О. Структура почв и современные подходы к ее изучению // Почвоведение. 2009. № 12. С. 1525–1527.
11. Касымова Ж.С., Оразжанова Л.К., Кливенко А.Н., Мусабаева Б.Х., Асержанов Д.К. Получение и свойства интерполимерных комплексов, способных к структурообразованию почв // Журн. прикладной химии. 2019. Т. 92(2). С. 208–217.
12. Куришбаев А.К., Звягин Г.А. Способность почвенных частиц к самосборке при различных системах обработки почв в Северном Казахстане // Международный научно-исследовательский журнал. 2017. № 2(56). С. 76–80.  
<https://doi.org/10.23670/IRJ.2017.56.001>
13. Кучина Ю.А., Долгопятова Н.В., Новиков В.Ю., Сагайдачный В.А., Морозов Н.Н. Инструментальные методы определения степени деацетилирования хитина // Вестник МГТУ. 2012. Т. 15(1). С. 107–113.
14. Литманович Е.А., Захарченко С.О., Стойчев Г.В., Зезин А.Б. Фазовое разделение в системе полиакриловая кислота – поликатион в кислых средах // Высокомолекулярные соединения. 2009. Т. 51(6). С. 940–945.
15. Минеев В.Г. Практикум по агрохимии. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2001. 689 с.
16. Мусабаева Б.Х., Кливенко А.Н., Касымова Ж.С., Оразжанова Л.К. Применение интерполимерных комплексов в экологических целях // Химический журн. Казахстана. 2018. № 4. С. 187–204.
17. Попова Э.В., Домнина Н.С., Коваленко Н.М., Борисова Е.А., Колесников Л.Е., Тюттерев С.Л. Биологическая активность хитозана с разной молекулярной массой // Вестник защиты растений. 2017. № 3(93). С. 28–33.
18. Сводный аналитический отчет о состоянии и использовании земель Республики Казахстан за 2017 год. Астана: Комитет по управлению земельными ресурсами, 2018. 273 с.
19. Холодов В.А. Способность почвенных частиц самопроизвольно образовывать макроагрегаты после цикла увлажнения и высушивания // Почвоведение. 2013. № 6. С. 698–706.
20. Чурсин А.И., Незванова К.В. Методы борьбы с деградацией почв в РФ // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2016. № 6(1). С. 88–91.
21. Шарипова А.Ш., Артикова Г.Н., Сейтназарова О.М., Ажиниязова Ш.С. О природе закрепления макромолекул полиэлектролита на почвенных частицах // Наука, техника и образование. 2016. № 6(24). С. 19–21.
22. Шеин Е.В. Физика почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2005. 432 с.
23. Aguilar R., Nakamatsu J., Ramirez E., Elgegren M., Ayarza J., Kim S., Pando M.A., Ortega-San-Martin L. The potential use of chitosan as a biopolymer additive for enhanced mechanical properties and water resistance of earthen construction // Construction and Building Materials. 2016. V. 114. P. 625–637.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.218>
24. Aidarova S., Bekturganova N., Kerimkulova M., Musabekov K., Sharipova A. Structure formation of the surface layer of soil as a way to prevent a wind and water erosion // Euras. Chem.-Technol. J. 2012. V. 14. P. 321–325.  
<https://doi.org/10.18321/ectj129>
25. Alsanad A. Novel Biopolymer Treatment for Wind Induced Soil Erosion. Arizona: State University, 2011. 233 p.
26. Gümüsoğlu T., Ari G.A., Deligöz H. Investigation of salt addition and acid treatment effects on the transport properties of ionically cross-linked polyelectrolyte complex membranes based on chitosan and polyacrylic acid // J. Membrane Sci. 2011. V. 376 (1–2). P. 25–34.  
<https://doi.org/10.1016/j.memsci.2011.03.040>
27. Hataf N., Ghadir P., Ranjbar N. Investigation of soil stabilization using chitosan biopolymer // J. Cleaner Production. 2018. V. 170. P. 1493–1500.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.256>
28. Kassymova Zh.S., Orazzhanova L.K., Bayakhmetova B.B., Gaisina B.S., Kassenova N.B., Yelemessova G.T. Preparation of interpolymer complexes of chitosan and sodium alginate // Bulletin University Karaganda-Chemistry. 2019. V. 93(1). P. 17–24.  
<https://doi.org/10.31489/2019Ch1/17-24>
29. Mukhamedov G.I., Xafizov M.M., Inagamov S.Ya. Interpolymer complexes. Structure, properties, application. LAP Lambert Academic Publishing, 2018. 200 p.

30. *Panova I., Drobyazko A., Spiridonov V.* Humics-based interpolyelectrolyte complexes for antierosion protection of soil: Model investigation // *Land Degradation Development*. 2019. V. 30. № 3. P. 337–347. <https://doi.org/10.1002/ldr.3228>
31. *Panova I.G., Sybachina A.V., Spiridonova V.V.* Non-stoichiometric interpolyelectrolyte complexes: Promising candidates for protection of soils // *Geoderma*. 2017. V. 307. P. 91–97. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.08.001>
32. *Zakharova L.Ya., Vasilieva E.A., Gaynanova G.A., Mirgorodskaya A.B., Ibragimova A.R., Salnikov V.V., Uchegbu I.F., Kononov A.I., Zuev Yu.F.* The polyacrylic acid/modified chitosan capsules with tunable release of small hydrophobic probe and drug // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2015. V. 471. P. 93–100. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2015.02.016>
33. *Zezin A.B., Mikheikin S.V., Rogacheva V.B., Zansokhova M.F., Sybachin A.V., Yaroslavov A.A.* Polymeric stabilizers for protection of soil and ground against wind and water erosion // *Adv. Coll. Interf. Sci.* 2015. V. 226. P. 17–23. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2015.06.006>

## Soil Structuring in the Presence of the Chitosan–Polyacrylic Acid Interpolymer Complex

L. K. Orazzhanova<sup>1</sup>, Zh. S. Kassymova<sup>1,\*</sup>, B. Kh. Mussabayeva<sup>1</sup>, and A. N. Klivenko<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Shakarim State University of Semey, Semey, 071400 Kazakhstan*

*\*e-mail: kassymova-z@mail.ru*

This article presents the results of the study of a new soil structuring agent an interpolymer complex of chitosan biopolymer and a synthetic polymer of polyacrylic acid which was first used for fixing the surface layer of light chestnut soil in the East Kazakhstan region. The interpolymer complex was obtained by mixing equimolar polymer solutions. The composition of the [chitosan] : [polyacrylic acid] complex was determined by the physical and chemical methods and was equal to [1] : [9]. The mechanical strength of the interpolymer complex film was higher in comparison with the films of individual polymers. When applying the interpolymer complex to the soil surface using a two-solution method, a significant improvement in the structure and anti-deflation resistance of the soil was observed. The resulting soil structures showed significant resistance to water erosion, which was about 99%. The obtained results indicate the possibility of using interpolymer complexes for structuring and improving the anti-erosion properties of degraded soils.

*Keywords:* soil erosion, soil structure, light chestnut soil (Kastanozems), interpolymer complex, polyelectrolyte

УДК 631.46

## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИИ NO-TILL И ВСПАШКИ НА МИКРОБИОМ ЮЖНЫХ АГРОЧЕРНОЗЕМОВ<sup>1</sup>

© 2020 г. Д. А. Никитин<sup>a, \*</sup>, Е. А. Иванова<sup>a</sup>, А. Д. Железова<sup>a</sup>, М. В. Семенов<sup>a</sup>,  
Р. Г. Гаджимаров<sup>b</sup>, А. К. Тхакахова<sup>a</sup>, Т. И. Чернов<sup>a</sup>, Н. А. Ксенофонтова<sup>a</sup>, О. В. Кутювая<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Почвенный институт им. В.В. Докучаева, Пыжевский пер., 7, стр. 2, Москва, 119017 Россия

<sup>b</sup>Северо-Кавказский федеральный научный аграрный центр,  
ул. Никонова, 49, Шпаковский р-н, Ставропольский край, Михайловск, 356241 Россия

\*e-mail: dimnik90@mail.ru

Поступила в редакцию 03.05.2020 г.

После доработки 02.06.2020 г.

Принята к публикации 27.06.2020 г.

Проведена оценка значений количественных характеристик микробного сообщества в южных агрочерноземах Ставропольского края, обрабатываемых по технологии no-till и традиционной вспашке с оборотом пласта, для вариантов с различными сельскохозяйственными культурами и при внесении/отсутствии минеральных удобрений. Численность эколого-трофических групп микроорганизмов (азотфиксаторов, аммонификаторов, денитрификаторов, амилитиков, целлюлитиков) оценивали с помощью классического метода посева на селективные среды, а количество копий рибосомальных генов архей, бактерий и грибов – с использованием полимеразной цепной реакции (ПЦР) в реальном времени. При вспашке увеличивается численность культивируемых аэробных аммонификаторов, денитрификаторов, аэробных целлюлитиков, актиномицетов и микромицетов; при прямом посеве (no-till) – численность анаэробных целлюлитиков и азотфиксаторов, аэробных диазотрофов и амилитиков. Кукуруза стимулирует развитие аммонификаторов и амилитиков в микробном сообществе почвы; соя – аэробных азотфиксаторов и аэробных целлюлитиков; подсолнечник – денитрификаторов и анаэробных целлюлитиков. Наибольшее количество копий генов бактерий и грибов обнаружено на участках no-till и в залежи, а архей – только в залежи. Полученные данные свидетельствуют о разной степени выраженности и направленности почвенно-биологических процессов агрочерноземов в условиях применения технологии no-till при выращивании основных сельскохозяйственных культур.

*Ключевые слова:* ПЦР-реал тайм, бактерии, архей, актиномицеты, микромицеты

DOI: 10.31857/S0032180X20120084

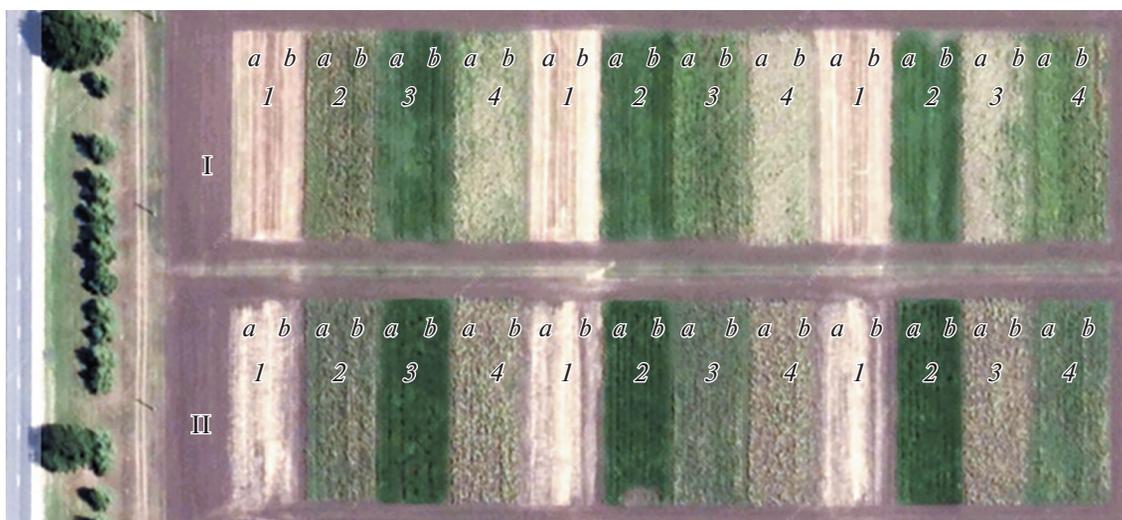
### ВВЕДЕНИЕ

Тип сельскохозяйственной обработки во многом определяет физические и химические характеристики почвы, рост и развитие растений и, в целом, продуктивность агроценозов [7, 29, 51]. Вследствие сельскохозяйственной обработки существенно меняется состав и функционирование сообществ микроорганизмов, населяющих почву и ризосферу [25, 48]. Преобладание патогенных или симбиотических микроорганизмов также зависит от физических свойств почвы – плотности, порозности, аэрированности, водно-воздушного и теплового режимов [6]. Существует большой объем данных о влиянии типа обработки почвы на сельскохозяйственные растения [1, 7, 17, 29, 44]. Одна-

ко информация о микробиологическом состоянии почв, возделываемых различными способами, носит фрагментарный характер [12, 43, 44].

В последнее время отмечается тенденция перехода многих хозяйств юга России с традиционной обработки почвы на минимальную с целью сохранения влаги в полях, уменьшения эрозии и снижения энергетических (топливных и трудовых) затрат [7, 14, 16, 22, 37]. Одним из вариантов минимальной является нулевая обработка (no-till), или прямой посев, при котором воздействие орудий земледелия на почву сведено к минимуму, а на поверхности полей сохраняется слой растительных остатков культуры-предшественника [8, 47]. Применение технологии no-till подвергается критике со стороны специалистов по ряду причин, одной из которых являются частые вспышки фитопатогенных инфекций на полях с данным типом обработки почвы [4, 7, 53]. При этом остается

<sup>1</sup> Дополнительные материалы к этой статье доступны по doi 10.31857/S0032180X20120084 для авторизованных пользователей.



**Рис. 1.** Поля опытного хозяйства ФГБНУ Северо-Кавказский ФНАЦ. Примечание: цифрами и буквами обозначены следующие варианты делянок: I – no-till; II – вспашка; 1 – озимая пшеница; 2 – подсолнечник; 3 – кукуруза; 4 – соя; a – без удобрений; b – с удобрениями.

неясным, как совокупное влияние факторов (типа обработки почвы, внесение удобрений и вида сельскохозяйственной культуры) оказывает более существенное действие на формирование почвенного микробиома сельскохозяйственных полей [7, 56].

Цель работы – оценить количественные изменения основных таксономических групп микробного сообщества при длительном применении технологии прямого посева (no-till) в южных агрочерноземах Ставропольского края.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Изучали образцы почв опытных полей чернозема обыкновенного среднемощного слабогумусированного тяжелосуглинистого на лёссовидных карбонатных суглинках [2, 13] в пределах опытного хозяйства ФГБНУ Северо-Кавказский ФНАЦ (45°07'48" N, 42°01'39" E), Шпаковский район Ставропольского края. Пахотный горизонт данной слабокислой (рН 6.32) почвы под традиционной обработкой содержал 2.24%  $C_{орг}$  и 11.9 мг/кг N-NO<sub>3</sub>, а также 18.7 мг/кг почвы лабильных форм фосфора (определено по методике Мачигина) и 245 мг/кг обменного калия. С увеличением глубины по почвенному профилю значения всех указанных параметров уменьшались. Горизонт С, выделенный на глубине 126–175 см, характеризовался следующими параметрами:  $C_{орг}$  – 0.38%; N-NO<sub>3</sub> – 0.5 мг/кг; P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> – 3.4 мг/кг; K<sub>2</sub>O – 155 мг/кг; рН 8.3. Длительность применения сельскохозяйственных обработок на изучаемых почвах составляет 7 лет. Повторность полевого опыта трехкратная (рис. 1). Площадь делянок

опытных полей – 300 м<sup>2</sup> (50 × 6 м), учетная – 90 м<sup>2</sup>. На половине делянок применяли минеральные удобрения перед посевом в расчетных дозах (озимая пшеница – N<sub>160</sub>P<sub>90</sub>K<sub>60</sub>; подсолнечник – N<sub>72</sub>P<sub>58</sub>K<sub>32</sub>; кукуруза – N<sub>80</sub>P<sub>48</sub>K<sub>48</sub>; соя – N<sub>60</sub>P<sub>60</sub>K<sub>60</sub>) с помощью сеялки при посеве.

Плотность почвы полей перед уборкой урожая в слое 0–10 см с традиционной обработкой составляла 1.23 г/см<sup>3</sup>, а для полей no-till – 1.24 г/см<sup>3</sup> [13]. Сельскохозяйственные культуры, возделываемые в севообороте: кукуруза (*Zea mays* L.), соя (*Glycine max* L.), озимая пшеница (*Triticum aestivum* L.) и подсолнечник (*Helianthus annuus* L.). В качестве контроля выбрали необрабатываемую залежную почву вблизи опытных полей. Отбор образцов проводили в трехкратной повторности из слоя 0–10 см в октябре 2018 г. с возможными мерами по предотвращению контаминации. До анализов образцы для классических микробиологических анализов хранили при температуре +4°C, а для молекулярно-биологических исследований – при –70°C. Список образцов приведен в табл. 1.

**Микробиологический посев.** Учет экологических групп микроорганизмов осуществляли в пятикратной повторности методом посева почвенной суспензии на твердые элективные среды: мясопептонный агар (МПА – бактерии-аммонификаторы), крахмалоаммиачный агар (КАА – амилолитики), голодный агар (ГА – олиготрофные бактерии, актиномицеты и микромицеты), среду Чапека (ЧА – микроскопические грибы), среду Гетчинсона с целлюлозными дисками (аэробные целлюлолитики) [21]; среду Эшби (аэробные азотфиксаторы); методом предельных разведений [17] на жидких средах учитывали: анаэробных диазотрофов (среда Вино-

**Таблица 1.** Список образцов, отобранных для микробиологических исследований

Номер варианта	Культура	Удобрения
No-till		
1	Соя	–
2		+
3	Кукуруза	–
4		+
5	Подсолнечник	–
6		+
7	Озимая пшеница	–
8		+
Традиционная (вспашка с оборотом пласта)		
9	Соя	–
10		+
11	Кукуруза	–
12		+
13	Подсолнечник	–
14		+
15	Озимая пшеница	–
16		+
	Залежь	
17	Разнотравье	–

градского), группу нитратного дыхания (среда ГНД), а также анаэробных целлюлолитиков (среда Гетчинсона с бумажными полосками фильтровальной беззольной бумаги) [6]. Для ЧА, ГА и КАА показатели разведения посева составляли 1 : 1000, 1 : 10000, 1 : 100000, а для ГЕ – 1 : 10, 1 : 100, 1 : 1000. Аликвоту почвенной суспензии объемом 100 мкл помещали на поверхность стерильных агаризованных сред в чашках Петри диаметром 90 мм. Для подавления роста бактерий в питательные среды Чапека и Гетчинсона добавляли порошок стрептомицина (100 мг/л). Перед посевом почвенную суспензию обрабатывали на вортексе MSV-3500 (Латвия) при скорости 3500 об./мин в течение 10 мин для десорбции клеток микроорганизмов с почвенных частиц [15].

Учет численности выросших колониеобразующих единиц (КОЕ) микромицетов осуществляли на 7, 14 и 20-е сутки. Из посевов в чистые культуры выделяли морфотипы по макро- и микрокультуральным признакам (микроскоп “Биомед-5”). Для всех изолятов микроскопических предварительно проводили идентификацию по культурально-морфологическим [28] или молекулярно-биологическим признакам (по анализу участков ITS1–ITS2 рДНК). ДНК из чистых культур микромицетов выделяли по методике Глушаковой с соавт. [35]: биомассу 5–6-суточной культуры пе-

реносили в 2 мл эппендорфы, добавляли 400 мкл стеклянных шариков (300–500 мкм диаметром) и 500 мкл лизирующего буфера (TrisBase 50 мМ, NaCl 250 мМ, ЭДТА 50 мМ, SDS 0.3%, pH 8). Приготовленную смесь взбалтывали на вортексе на скорости 3500 об./мин в течение 15 мин, затем инкубировали 1 ч при температуре 65°C, после снова трясли на вортексе 15 мин и центрифугировали (13.4 гм) 10 мин, отбирали надосадочную жидкость. Для амплификации региона рДНК, содержащего D1/D2 домен региона 26S рДНК, использовали праймеры ITS1f (5' CTTG-GTCATTTAGAGGAAGTA) и NL4 (5' GGTC-CGTGTTTCAAGACGG) и смеси для ПЦР ScreenMix (ЗАО “Евроген”, Москва). Амплификатор использовали по следующей программе: начальная денатурация – 2 мин при температуре 96°C; затем 35 циклов: денатурация – 20 с при температуре 96°C, отжиг праймеров – 50 с при температуре 52°C, синтез ДНК – 1.5 мин при температуре 72°C; конечная достройка 7 мин при температуре 72°C. ПЦР-продукт очищали с использованием набора BigDye XTerminator Purification Kit (Applied Biosystems, USA). Для секвенирования использовали праймер NL4. Секвенирование ДНК проводили с помощью набора реактивов BigDye Terminator V3.1 Cycle Sequencing Kit (Applied Biosystems, USA) с последующим анализом продуктов реакции на секвенаторе Applied Biosystems 3130xl Genetic Analyzer в Научно-производственной компании “Синтол” (Москва). Идентификацию по полученным хроматограммам проводили используя данные генбанка NCBI и SABI Bioscience Database Index Fungorum.

**Экстракция тотальной ДНК из почв.** Тотальную ДНК экстрагировали из почвенных образцов массой 0.2 г с помощью набора PowerSoil DNA Isolation Kit (MO BIO Laboratories, США) согласно протоколу производителя. До выделения ДНК образцы хранили при –70°C. Первичную обработку почвенных образцов проводили с использованием гомогенизатора Precellys 24 (Bertin Technologies, Франция).

**Количественную оценку содержания рибосомальных генов** бактерий, архей и грибов осуществляли методом полимеразной цепной реакции (ПЦР) в реальном времени. Для учета архей и бактерий использовали праймеры на ген 16S рРНК, для учета грибов – на регион ITS. Реакцию проводили в амплификаторе Real-Time CFX96 Touch (“Bio-Rad”). Реакционную смесь готовили из препарата SuperMix Eva Green (“Bio-Rad”). В качестве количественных стандартов концентрации генов 16S рРНК для бактерий использовали растворы клонированных фрагментов рибосомального оперона штамма *Escherichia coli* K12, для архей – штамма *Halobacterium salinarum* FG-07, для грибов – штамма дрожжей *Saccharomyces cerevisiae* Meyen 1B-D1606. Для каждого образца реакцию проводили в трех повторностях. Концентрацию генов рассчитывали с

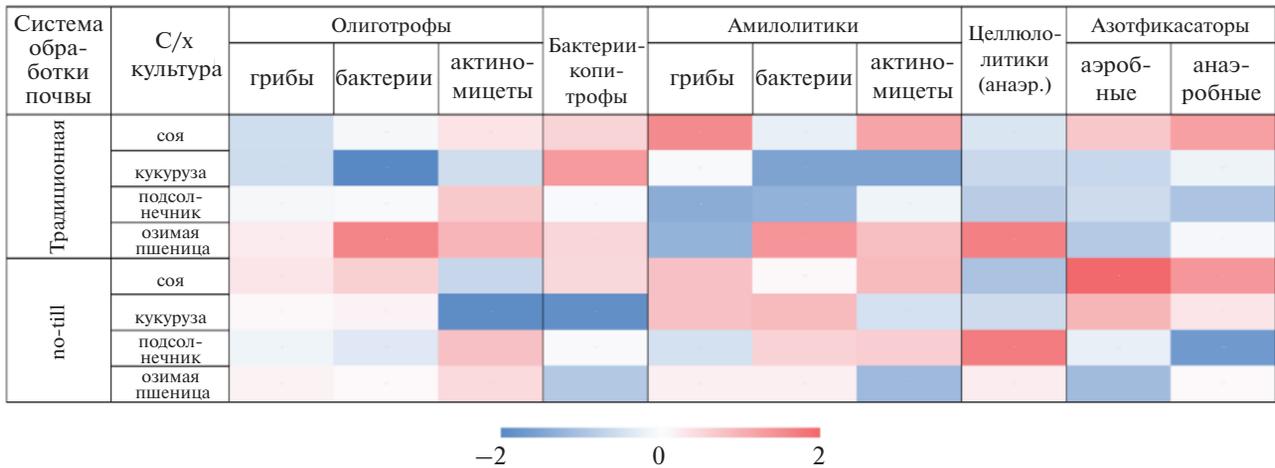


Рис. 2. Теплокарта влияния исследуемых факторов (тип обработки почвы и сельскохозяйственной культуры) на развитие культивируемых микроорганизмов. Данные представлены в виде значений  $\lg N$  (где  $N$  – количество КОЕ/г почвы микроорганизмов определенной эколого-трофической группы), нормализованных по принципу Z-трансформации.

помощью программного обеспечения CFX Manager. Концентрацию генов в препаратах ДНК пересчитывали в количество генов на 1 г почвы с учетом разведений и массы навески.

Статистическую обработку результатов проводили в программах Statistica 10.0 и Microsoft Excel 2016. Визуализацию данных посевов на элективные среды осуществляли при помощи метода теплокарты (heat map). Данные представлены в виде значений  $\lg N$  (где  $N$  – количество КОЕ/г почвы микроорганизмов определенной эколого-трофической группы), нормализованных по принципу Z-трансформации. Шкалирование образцов по количеству копий рибосомальных генов бактерий, архей и грибов проводили с использованием метода главных компонент (Principal Component, PC) в рамках программного пакета past 3.25 [41].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

**Микробиологические посевы.** Наименьшая численность аэробных азотфиксаторов (25–30% обрастания почвенных комочков на среде Эшби) выявлена в образцах почвы под озимой пшеницей и подсолнечником (рис. 2), что характерно для зерновых культур [9]. Наибольшее количество азотфиксаторов (81–84% обрастания) определено под соей – представителем бобовых, в ризосфере которых всегда обнаруживают высокое обилие diaзотрофов [3, 33], увеличивающих количество доступных для растений форм азота. Для залежной почвы отмечали среднюю активность *Azotobacter* – 38% обрастания. В образцах почв с обработкой no-till (за исключением вариантов удобренной озимой пшеницы и подсолнечника без удобрений) выявлено большее (на 10–35% обрастания комочков) количество культивируемых азотфиксаторов по сравнению с пахотной

почвой. Таким образом, технология прямого сева приближает сельскохозяйственные почвы к нативным/фоновым [40], где велика численность аэробных азотфиксаторов [26].

Наименьшая численность анаэробных азотфиксаторов выявлена для вариантов удобренных полей no-till под подсолнечником  $8.9 \times 10^2$  КОЕ/г почвы. Эта сельскохозяйственная культура имеет развитую (до 3 м длиной) корневую систему, которая обеспечивает значительную аэрацию [27, 39]. Наибольшее количество анаэробных азотфиксаторов ( $8.3 \times 10^6$  КОЕ/г почвы) обнаружено под культурами сои и кукурузы вне зависимости от обработки почвы и наличия удобрений. Обилие анаэробных diaзотрофов больше (кроме варианта с подсолнечником) для делянок no-till, где почва относительно уплотнена и содержит меньше кислорода [36].

Наибольшую долю среди микроорганизмов азотного цикла занимает неспецифическая группа аммонификаторов, обилие которых является показателем интенсивности минерализации органического вещества и высвобождения азота из почвы [26, 46, 54]. Количество их КОЕ на среде МПА минимально ( $4.9 \times 10^6$ /г почвы) для полей no-till под неудобренными кукурузой и подсолнечником, что показано и для других черноземных почв [12, 23]; максимально ( $7.2 \times 10^7$ /г почвы) – для вспахиваемых полей под неудобренными кукурузой и озимой пшеницей (рис. 2). Для залежи и всех вариантов no-till обнаружено снижение численности аммонификаторов, что сближает их с фоновыми почвами, где почвообразующие процессы направлены на накопление гумусовых веществ [24]. В то же время на полях под соей (культурой с повышенным содержанием белка [46] и являющейся хорошим субстратом для данной

группы микроорганизмов) технология обработки почвы не влияла на численность бактерий, вырастающих на МПА. Фактор удобрения не оказывал положительного или отрицательного влияния на количество КОЕ аммонификаторов, кроме вариантов no-till под соей и подсолнечником, где численность микроорганизмов увеличивалась при наличии дополнительного источника НРК.

Ни один из рассматриваемых факторов (тип обработки почвы, удобрения и сельскохозяйственная культура) не оказывал воздействия на относительно высокую численность денитрификаторов во всех рассматриваемых образцах, что соответствует ранее полученным данным для других подтипов черноземов [11]. Наибольшая численность культивируемых денитрификаторов выявлена для участков no-till с подсолнечником без удобрений. Для остальных вариантов с обработкой no-till количество денитрификаторов меньше, чем для вспаханных участков.

Численность КОЕ олиготрофных микроорганизмов на среде ГА практически не зависела от типа обработки почвы, наличия/отсутствия удобрений или вида растения, составляя от  $9.8 \times 10^4$  до  $5.7 \times 10^6$ /г почвы, что типично для черноземных почв [11]. В то же время для вариантов как удобренной, так и неудобренной озимой пшеницы, сои и кукурузы количество колоний микроорганизмов больше для вспаханных участков, чем для no-till. Это может быть связано со спецификой метода исследования, при которой учитываются модульные элементы микроорганизмов. Их количество может возрастать в поле после его механической обработки. Микроорганизмы (в первую очередь, грибы и актиномицеты) являются модульными организмами, что предопределяет их размножение не только специализированными, но и вегетативными клетками (в том числе частями мицелия). При вспашке происходит рыхление и перемешивание почвы с разрушением почвенных агрегатов, и, как следствие, разрывом колоний и гиф микробиоты. Часть из них способна к активному росту, этому способствуют оптимальные лабораторные условия на питательных средах. Поэтому метод микробиологического посева обычно выявляет существенно увеличение численности КОЕ микромицетов в почвах вспахываемых полей по сравнению с теми, где земля механически не обрабатывается сельскохозяйственной техникой [28].

Мицелиальная организация тела некоторых микроорганизмов позволяет им занимать лидирующие позиции в экосистемах с низким содержанием органического вещества [5, 28], что, вероятно, предопределило доминирование актиномицетов и грибов именно на среде ГА. Численность олиготрофных актиномицетов составила от  $10^4$  КОЕ/г почвы под кукурузой в системе no-till без удобрений

до  $10^7$  КОЕ/г почвы под неудобренными участками no-till сои. Согласно результатам дисперсионного анализа, количество КОЕ этой группы мицелиальных микроорганизмов было одинаковым в вариантах под подсолнечником вне зависимости от типа обработки почвы и наличия/отсутствия удобрений. В вариантах под соей и кукурузой максимальные значения мицелиальных микроорганизмов обнаружены в варианте no-till без удобрений.

Олиготрофные микромицеты – доминанты на ГА, поскольку количество их пропагул для большинства образцов, посеянных на этой селективной среде, достигало  $10^5$ – $10^6$  КОЕ/г почвы. В то же время численность микроскопических грибов в образцах традиционно обработанной участки под кукурузой не превышала  $10^2$  КОЕ/г почвы, независимо от присутствия удобрений, что показано ранее [42, 50]. Для вариантов с озимой пшеницей на численность микромицетов значимо влияет только фактор внесения удобрений. В случаях их отсутствия количество КОЕ микроскопических грибов уменьшается, что согласуется с другими исследованиями [30, 32]. В образцах почвы с полей no-till под соей выявлено достоверное увеличение численности микромицетов, что, вероятно, связано с обилием азота, продуцируемого бактериальными симбионтами бобовых [46].

Микроскопические грибы учитывали также на среде Чапека со стрептомицином для ингибирования бактерий. Количество их КОЕ очень низко – от  $1.1 \times 10^2$  КОЕ/г почвы для традиционно обработанных полей удобренной пшеницы и подсолнечника до  $3.2 \times 10^3$  КОЕ/г почвы – для вспаханных полей сои вне зависимости от внесения удобрений и кукурузы без удобрений. Такую низкую численность можно объяснить слишком высокой концентрацией сахаров в среде Чапека для большинства почвенных микромицетов [28]. Не исключено, что именно культура-предшественник является главным фактором интенсивности развития микроскопических грибов на вспахываемых полях [32, 52]. Предшественники указанных растений в данном случае – пропашные культуры, после уборки которых остается много надземных частей, являющихся хорошим субстратом для развития микромицетов [38]. Кроме того, отсутствие удобрений способствовало увеличению численности микромицетов под всеми культурами на традиционно обработанных полях.

Сапротрофные микромицеты являются неспециализированной микробиотой, минерализующей почвенное органическое вещество и активно участвующей в гумусообразовании [32, 42, 52]. Как для no-till, так и для вспаханных участков таксономическая структура сообществ микромицетов сложна и представлена рядом родов, доминантами среди которых являются: *Acremonium*, *Aspergillus*, *Aureobasidium*, *Cadophora*, *Coniothyrium*, *Cunningham*

*mella*, *Epicoccum*, *Eurotium*, *Geotrichum*, *Metarhizium*, *Monilia*, *Mortierella*, *Mucor*, *Paecilomyces*, *Penicillium*, *Pseudogymnoas*, *Rhizopus*, *Sarocladium*, *Talaromyces*, *Trichoderma*, *Umbellopsis*. Все они – типичные обитатели почв умеренного климата, но многие виды (*Alternaria tenuissima*, *Cladosporium* spp., *Cochliobolus lunatus*, *Fusarium poae*, *F. solani*, *Hemicola fuscoatra*, *Phoma exhigua*, *Ph. herbarum*, *Stachybotrytis chartarum*, *Verticillium tenerum*) значатся в реестрах как потенциальные фитопатогены [28]. В то же время численность патогенных для растений микроскопических грибов в наших объектах исследования невелика (от  $2.0 \times 10^1$  до  $8.0 \times 10^1$  КОЕ/г почвы), что исключает возможность массового заражения растений и потери урожая в ближайшее время.

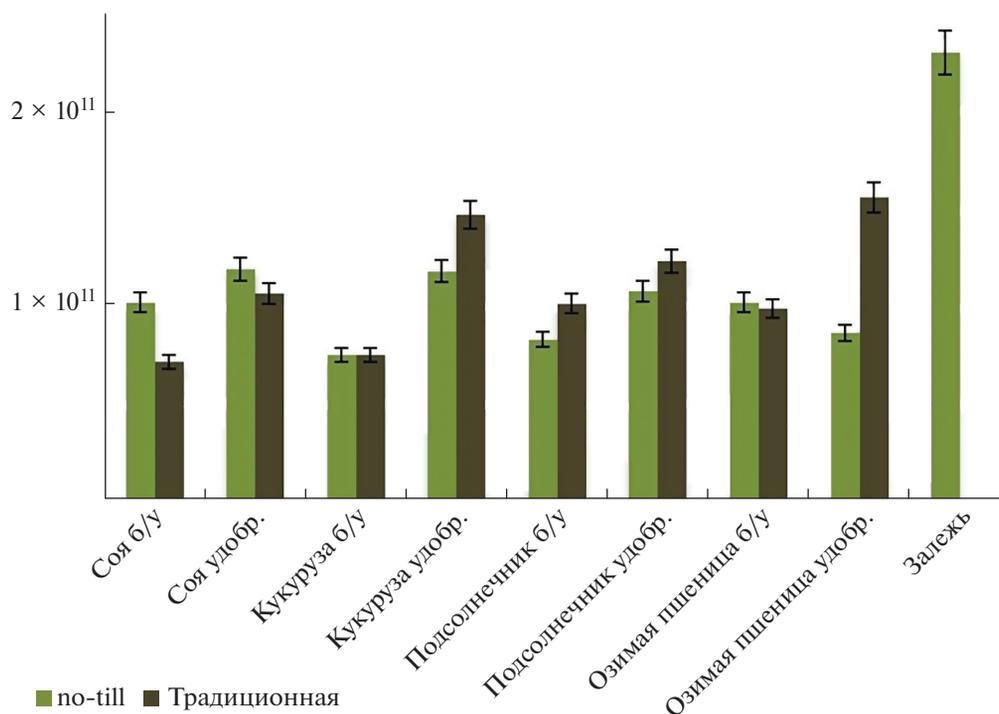
Минимальные значения для амилолитических бактерий, играющих важную роль в разложении растительных остатков с обилием крахмала [55], выявлены в образцах залежи ( $8.1 \times 10^5$  КОЕ/г почвы), а также традиционно обрабатываемых и удобренных полей под соей, подсолнечником и кукурузой ( $1.3 \times 10^6$  КОЕ/г почвы). Факторы, влияющие на скорость разложения растительных остатков для агрочерноземов с разными типами обработками почвы, не вполне ясны [16, 18]. Однако уменьшение количества представителей данной эколого-трофической группы может быть обусловлено токсическим действием минеральных удобрений [34]. Максимальная численность КОЕ ( $3.6 \times 10^7$  КОЕ/г почвы) отмечена в варианте вспахиваемого неудобренного поля под кукурузой. Значительное внесение минеральных солей угнетало амилолитиков на полях no-till под всеми культурами, кроме пшеницы. Это подтверждают другие исследования, сравнивающие влияние минеральных удобрений на таксономическую структуру почвенных микроорганизмов сельскохозяйственных полей [34]. Достоверно максимальная численность амилолитических бактерий выявлена в почве пашни под кукурузой без удобрений и в удобренной почве с no-till также под кукурузой, что можно объяснить повышенным содержанием полисахаридов в корневых выделениях культуры, а также обилием пожнивных остатков на полях [55].

Большинство учитываемых амилолитических бактерий относится к мицелиальным формам – актиномицетам, зачастую улучшающим структуру почвы с агрономической точки зрения [3, 5]. Количество КОЕ этих микроорганизмов на среде КАА составляет от  $1.0 \times 10^4$  КОЕ/г почвы в образцах неудобренных полей сои вне зависимости от типа обработки почвы до  $4.4 \times 10^7$  КОЕ/г почвы на удобренных полях под соей. Наличие удобрений на полях no-till с подсолнечником и вспаханных полях под озимой пшеницей существенно увеличивает численность актиномицетов.

Растительная мульча во многих случаях способствует развитию актинобактерий в почве [30]. Однако на кукурузных полях, независимо от способа обработки почвы, а также на вспаханных полях с подсолнечником количество КОЕ актиномицетов уменьшалось. Не было выявлено четкой корреляции между численностью микроорганизмов и типом обработки почвы или наличием удобрений, что согласуется с ранее полученными результатами для серых лесных почв, находящихся в сельскохозяйственном использовании [20]. Дисперсионный анализ показал отсутствие зависимости обилия актиномицетов от вида растения. Тем не менее, отмечены тенденции к росту количества актиномицетных КОЕ на вспаханных и неудобренных полях под соей, подсолнечником и озимой пшеницей, а также на неудобренных полях no-till под кукурузой, как и в образцах удобренных полей под кукурузой и подсолнечником.

Для большей части исследованных образцов количество КОЕ микроскопических грибов на среде КАА незначительно –  $10^2$  КОЕ/г почвы. Тем не менее, для неудобренных полей no-till с кукурузой, богатой крахмалом [55], численность амилолитических микромицетов возрастает до  $10^3$ – $10^4$  КОЕ/г почвы. В образцах удобренных полей no-till под соей, подсолнечником и озимой пшеницей увеличивается численность микромицетов, что может быть связано с обилием растительных остатков при данной обработке почвы [10, 30]. В образцах залежи микроскопических грибов при высеве на среде КАА не обнаружено. Так же, как для других амилолитических мицелиальных микроорганизмов (актиномицетов), дисперсионный анализ не выявил достоверной разницы между численностью микромицетов для всех исследуемых вариантов. Таким образом, тип обработки почвы, наличие удобрений и вид растения не влияли на обилие микромицетов данной эколого-трофической группы, что соответствует ранее полученным данным [11]. Исключением является лишь резкое увеличение количества КОЕ микромицетов-амилолитиков в варианте вспахиваемого поля под озимой пшеницей вне зависимости от фактора удобрения.

Микроскопические грибы *Chaetomium globosum*, *Doratomyces stemonitis*, *Oidiodendron* sp., *Rhizopus stolonifer*, *Trichoderma* spp. являлись доминирующими аэробными целлюлолитами на среде Гетчинсона в исследованных образцах несмотря на то, что их численность не превышала  $3.0 \times 10^2$  КОЕ/г почвы. Наибольшее количество КОЕ микромицетов данной эколого-трофической группы присутствует в образцах неудобренных полей под подсолнечником вне зависимости от системы обработки почвы и в почвах вспахиваемых полей под соей, несмотря на наличие/от-



**Рис. 3.** Количество копий генов 16S рДНК бактерий для делянок, обработанных традиционно (вспашка с оборотом пласта) и по технологии no-till. Здесь и далее: б/у – без удобрений; удобр. – с минеральными удобрениями.

сутствие удобрений. Низкая численность культивируемых аэробных целлюлолитиков может быть связана с обилием доступных органических веществ в прикорневой зоне растений [20], потребление которых микромицетами более эффективно, чем разложение целлюлозы. Эта гипотеза подтверждается более низкой численностью микроскопических грибов на среде Гетчинсона (в среднем от  $0.6 \times 10^2$ /г почвы), чем на среде Чапека (в среднем  $7.1 \times 10^2$  КОЕ/г почвы).

Численность аэробных целлюлолитических микроорганизмов существенно выше ( $2.7 \times 10^4$  КОЕ/г почвы), чем анаэробных ( $6.5 \times 10^2$  КОЕ/г почвы). Особенно ярко это проявилось для полей no-till всех культур, кроме озимой пшеницы, поскольку верхний слой почвы полей с минимальной обработкой почвы уплотнен и содержит меньше кислорода [7, 12]. Наименьшая же целлюлолитическая активность наблюдалась в анаэробных условиях для образцов вспаханных полей под соей и кукурузой, где количество растительных остатков, а значит, и целлюлозы после уборки урожая, ниже, чем для других исследованных растений [46]. В противоположность этому, высокая активность анаэробных целлюлолитиков выявлена в образцах под подсолнечником, обильные пожнивные остатки которого могут стимулировать разложение целлюлозы микроорганизмами [30].

**Численность копий рибосомальных генов прокариот и грибов.** Численность копий рибосомальных

генов бактерий в полях без внесения удобрений колебалась от  $7.0 \times 10^{10}$  до  $2.3 \times 10^{11}$  копий генов/г почвы (рис. 3). Минимальные значения выявлены в образцах почвы с традиционной обработкой под культурами сои и кукурузы, а максимальные – при обработке no-till под озимой пшеницей и в залежи. В целом наблюдалось увеличение численности копий генов бактерий и грибов в вариантах no-till по сравнению с традиционной обработкой вне зависимости от применения удобрений. Сходные тенденции обнаружены в других исследованиях [11, 12, 43], в которых отмечалось увеличение численности микроорганизмов в почвах при минимальной обработке. Содержание копий генов бактерий значительно выше в залежи, чем в почвах под сельскохозяйственными культурами. Это может быть связано с постепенным восстановлением невозделываемых земель до естественного состояния биоценозов, где обычно разнообразие и обилие микроорганизмов больше, чем в агроценозах [43, 50]. Практически полное отсутствие влияния фактора удобрений на количество копий рибосомальных генов, как прокариот, так и грибов (рис. 3–5), может быть связано с высокой буферностью черноземов из-за большого содержания гумусовых веществ. Численность копий генов бактерий почти в 2 раза больше под озимой пшеницей, чем под соей и кукурузой, как для варианта традиционной обработки, так и для no-till. Такая закономерность, по-види-

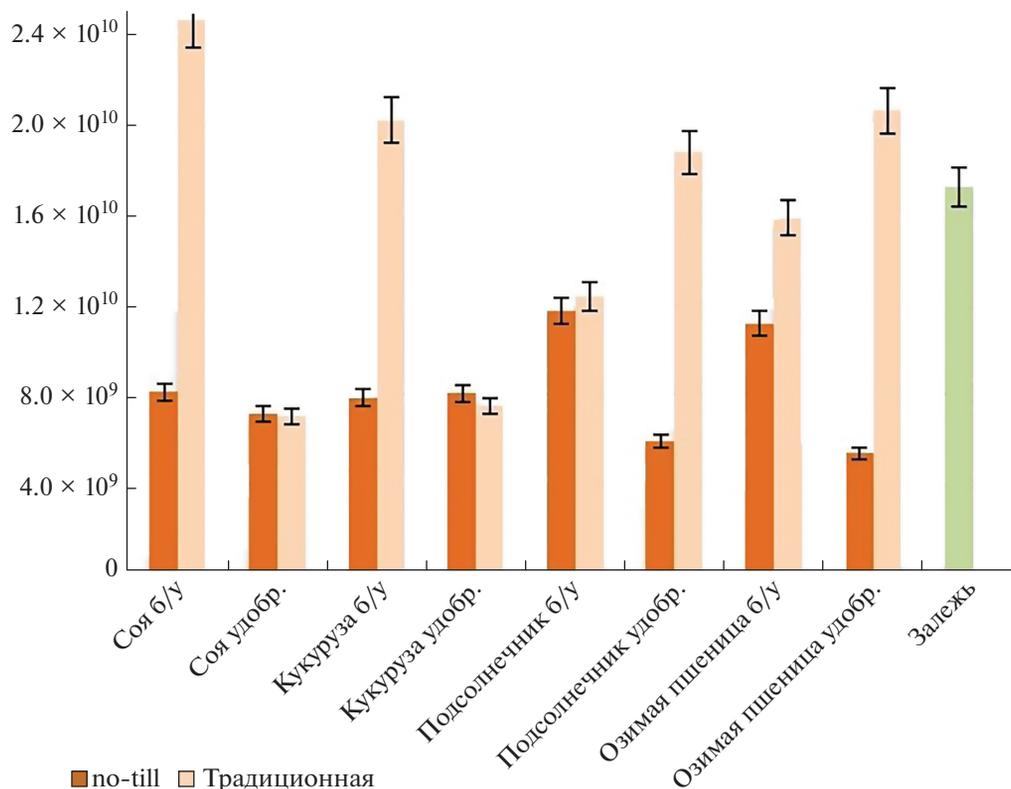


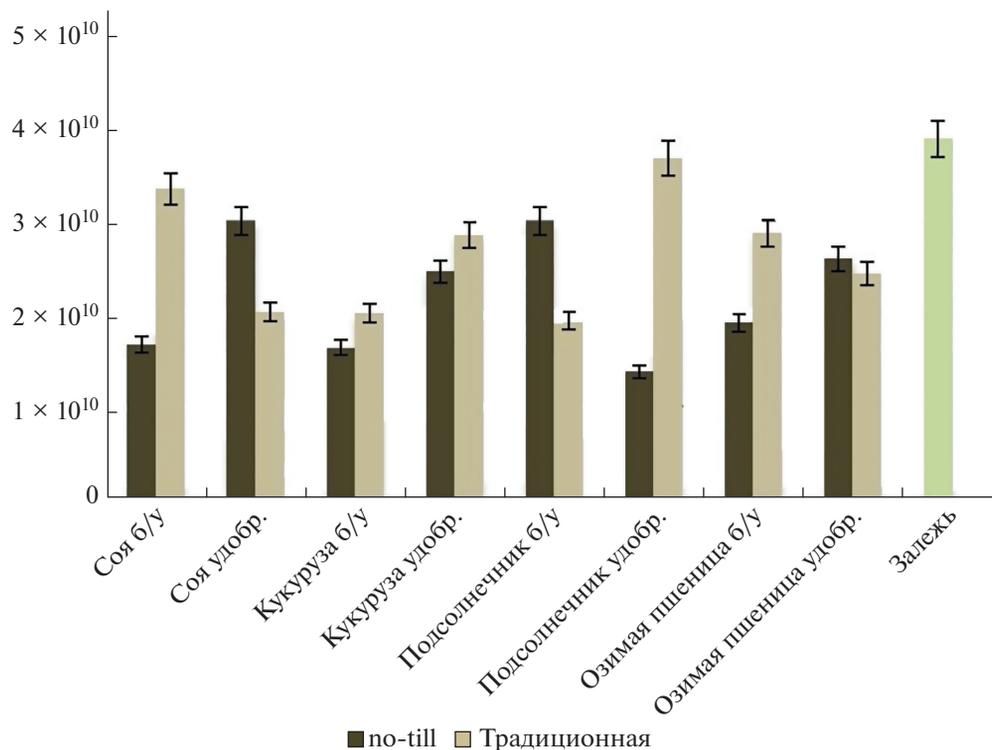
Рис. 4. Количество копий генов 16S рДНК архей для делянок, обработанных традиционно (вспашка с оборотом пласта) и по технологии no-till.

тому, связана с большей разветвленностью корневой системы, а значит и большим объемом ризосферы пшеницы по сравнению с другими рассматриваемыми сельскохозяйственными культурами [19, 31].

Диапазон полученных значений численности копий рибосомальных генов бактерий в исследованных образцах удобренных почв варьирует от  $6.0 \times 10^{10}$  до  $2.3 \times 10^{11}$  копий генов/г почвы. Наименьшее количество бактериальных генов выявлено в вариантах почв с традиционной обработкой под кукурузой и подсолнечником, а максимальные – на делянке no-till под озимой пшеницей и в залежи. Такая закономерность показывает мощное влияние обработки почвы на развитие микроорганизмов: микробное сообщество лучше развивается в почвах близких к нативным [12, 49].

Количество копий генов архей на порядок ниже бактериальных и варьировало от  $7.0 \times 10^9$  до  $1.7 \times 10^{10}$  генов/г почвы (рис. 4). В большинстве почв умеренного климата сохраняется такое соотношение для прокариот [4, 19]. Минимальные значения характерны для вариантов no-till под подсолнечником и традиционно обработанной делянки под озимой пшеницей вне зависимости от наличия удобрений. Такое явление связано со специфичностью экологических ниш, за-

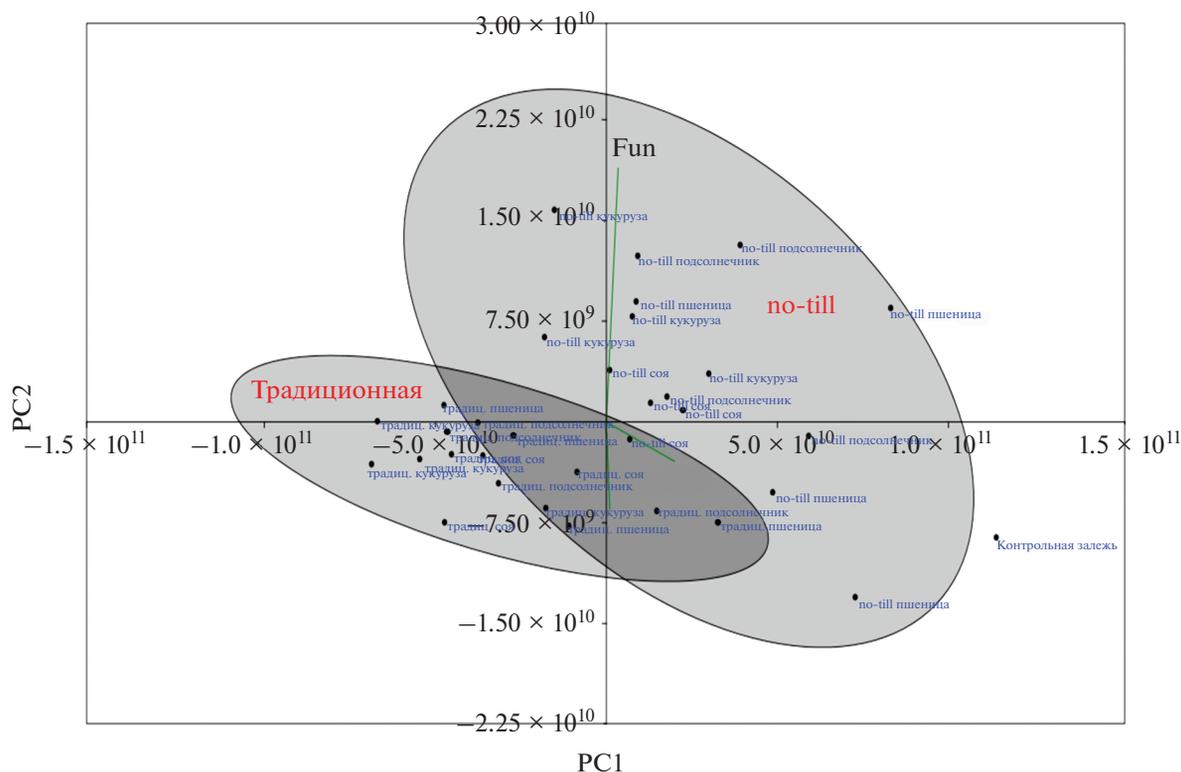
нимаемыми археями [11, 12, 43]. Так же, как для бактерий, обилие архей максимально в залежи и существенно больше, чем в делянках под сельскохозяйственными культурами, что можно объяснить приближенностью залежи к фоновым почвам [40], где архей практически всегда больше, чем в агроценозах [19]. Наибольшая численность архей, как и бактерий, среди вариантов с сельскохозяйственными культурами отмечена в образцах поля no-till под озимой пшеницей. Это может быть связано со значительным объемом ризосферы этого растения по сравнению с другими рассматриваемыми растениями [11, 12, 31, 43, 50]. В то же время практически идентичные значения выявлены в почве с традиционной обработкой под соей. Причина такого явления может заключаться в том, что эта культура относится к бобовым, которые с помощью симбиотических прокариот увеличивают содержание азота в прикорневой почве [46]. В ризосфере бобовых могут развиваться представители архей, принимающие участие в трансформации азота и проводящие процессы нитрификации и денитрификации. Для вариантов с удобрениями разница между значениями в полях без и с сельскохозяйственными культурами достигает порядка, что свидетельствует о значимости этого фактора для развития микроорганизмов, показанного во многих работах [20, 45].



**Рис. 5.** Количество копий генов ITS рДНК грибов для делянок, обработанных традиционно (вспашка с оборотом пласта) и по технологии no-till.

Численность копий рибосомальных генов грибов в исследованных образцах варьирует в менее широком диапазоне, чем для прокариот – от  $1.7 \times 10^{10}$  до  $4.1 \times 10^{10}$  генов/г почвы. Порядок этих значений соответствует величинам, полученным в предыдущих исследованиях для черноземных почв [4, 11, 12, 19]. Минимальные значения численности копий рибосомальных генов грибов обнаружены в образцах почвы с традиционной обработкой, вне зависимости от присутствия удобрений и сельскохозяйственной культуры (рис. 5). Такая ситуация представляется типичной для данной группы микроорганизмов [12, 43], что может быть связано с меньшим содержанием органического вещества, в частности, растительных остатков в пахотной почве, а также повреждением мицелия при механической обработке почвы. Согласно полученным данным, традиционная обработка почвы существенно подавляет рост микобиоты вне зависимости от сельскохозяйственной культуры и удобрений. Соответственно, максимум микобиоты выявлен на делянках no-till и залежи. Характерно, что количество копий генов грибов в последних из перечисленных вариантов находится примерно на одном уровне, что может свидетельствовать о первостепенном значении растительных остатков и минимизации повреждений мицелия для развития грибов [28].

Таким образом, после проведения шкалирования образцов по количеству копий рибосомальных генов бактерий, архей и грибов с использованием метода главных компонент можно сделать следующие выводы. По эколого-функциональному составу микробиома залежь в значительной степени отличается от всех вариантов обрабатываемых делянок (рис. 6). Судя по методу количественной ПЦР (в противоположность результатам по микробиологическому посеву), технология обработки почвы no-till не приближает состав микробиома к таковому на залежи. По-видимому, это связано с определяющим фактором растительности, которая коренным образом отличается на залежи и возделываемых делянках [13]. Отметим, что ось PC1 положительно коррелирует с численностью рибосомальных генов 16S рДНК бактерий, в то время как ось PC2 – с количеством рибосомальных генов ITS рДНК грибов. Это означает, что обилие генов бактерий в первую очередь определялось фактором культуры возделываемого на делянке растения, а численность генов грибов – типом обработки почвы. Кроме того, судя по результатам шкалирования, традиционная обработка уменьшает количество копий рибосомальных генов всех групп микроорганизмов, однако в отношении архей данный эффект прослеживается лишь на уровне тенденции.



**Рис. 6.** Шкалирование образцов по количеству копий рибосомальных генов бактерий, архей и грибов с использованием метода главных компонент: bac – бактерии; arc – археи; fun – грибы. Статистические параметры РС-осей представлены в табл. S1.

Построение параметрической модели показало, что исследуемые типы обработки почвы достоверно изменяют численность лишь бактерий и грибов, но не архей (рис. S1). Вероятно, такой факт связан с доминированием бактерий среди прокариот черноземных почв [19].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Фактор обработки почвы оказал влияние на численность отдельных таксономических и эколого-трофических групп микроорганизмов. Традиционная обработка изученных агрочерноземов приводит к росту активности аэробных аммонификаторов, денитрификаторов, аэробных целлюлолитиков, актиномицетов и микромицетов. В свою очередь при обработке no-till повышается общая численность грибов и бактерий (как по численности копий рибосомальных генов, так и по количеству КОЕ/г почвы), количество архей, активность анаэробных целлюлолитиков, азотфиксаторов, аэробных диазотрофов и амилотитиков.

Фактор удобрения практически не оказывал влияния на количественные показатели микроорганизмов в исследуемых почвах, видимо, из-за неравномерного внесения минеральных веществ и буферных свойств чернозема.

Фактор возделываемой сельскохозяйственной культуры существенно влияет на структуру почвенного микробиома. Численность копий генов бактерий и архей почти в 2 раза больше под озимой пшеницей, чем под соей и кукурузой. Кукуруза стимулирует развитие аммонификаторов и амилотитиков; соя увеличивает количество аэробных азотфиксаторов и аэробных целлюлолитиков; подсолнечник вызывает обильный рост денитрификаторов и анаэробных целлюлолитиков; на присутствие озимой пшеницы рассматриваемые эколого-трофические группы микроорганизмов не реагируют.

Количество копий генов прокариот, в первую очередь, определялось фактором культуры возделываемого на делянке растения, а численность генов грибов – типом обработки почвы. Содержание копий генов всех рассматриваемых таксономических групп микроорганизмов (бактерии, археи, грибы) значительно больше в залежи, чем в почвах под сельскохозяйственными культурами.

Таким образом, соотношения групп микроорганизмов показали свой потенциал при биоиндикации, в том числе при оценке степени аэробных/анаэробных условий среды обитания почв степной зоны в условиях минимизации обработки почвы полученные результаты свидетельству-

ют о значительных различиях состава и структуры почвенного микробиома при переходе от вспашки к технологии no-till. Поэтому микроорганизмы можно использовать как маркер степени экологизации земледелия в черноземной полосе.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке проекта федеральной целевой программы “Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы” на тему “Глобальный климат и агроландшафты России: разработка системы оценки и управления рисками деградации Русских черноземов” (соглашение с Минобрнауки России № 075-15-2019-1689 от 6 декабря 2019 г., уникальный идентификатор проекта RFME-FI60419X0222).

#### ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Таблица S1. Процент вариации, объясненный каждой из РС-осей.

Рис. S1. Параметрическая модель влияния фактора обработки почвы на структуру микробиома.

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Беляева О.Н.* Система no-till и ее влияние на доступность азота почв и удобрений: обобщение опыта // *Земледелие*. 2013. № 7. С. 16–18.
2. *Гаджиумаров Р.Г., Жукова М.П.* Влияние технологий возделывания и удобрений на рост, развитие и урожайность сои в зоне неустойчивого увлажнения Центрального Предкавказья // *Вестник АПК Ставрополя*. 2018. № 1(29). С. 81–85.
3. *Добровольская Т.Г., Звягинцев Д.Г., Чернов И.Ю., Головченко А.В., Зенова Г.М., Лысак Л.В., Манучарова Н.А., Марфенина О.Е., Полянская Л.М., Степанов А.Л., Умаров М.М.* Роль микроорганизмов в экологических функциях почв // *Почвоведение*. 2015. № 9. С. 1087–1096. <https://doi.org/10.7868/S0032180X15090038>
4. *Железова А.Д., Пассова Д.И., Никитин Д.А., Яшин М.А., Железова С.В.* Влияние способа сельскохозяйственной обработки на микробиологические характеристики дерново-подзолистой почвы // *Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева*. 2019. № 99. С. 117–144. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2019-99-117-144>
5. *Зенова Г.М., Манучарова Н.А., Звягинцев Д.Г.* Экстремофильные и экстремотолерантные актиномицеты в почвах разных типов // *Почвоведение*. 2011. № 4. С. 457–478.
6. *Ильина Т.К., Фомина О.М.* Автор. св-во № 113328а от 30.06.83. “Питательная среда для культивирования почвенных микроорганизмов”.
7. *Кирюшин В.И.* Проблема минимизации обработки почвы: перспективы развития и задачи исследования // *Земледелие*. 2013. № 7. С. 3–6.
8. *Кирюшин В.И.* Наследие В.Р. Вильямса и современные проблемы агропочвоведения // *Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии*. 2014. № 1. С. 5–15.
9. *Кожмяков А.П., Проворов Н.А., Завалин А.А., Шотт П.Р.* Оценка взаимодействия сортов ячменя и пшеницы с ризосферными ростстимулирующими бактериями на различном азотном фоне // *Агрохимия*. 2004. № 3. С. 33–40.
10. *Кузнецов Ю.Г., Васильченко А.П.* Влияние предшественника и способа основной обработки почвы на биоэнергетическую эффективность выращивания озимой пшеницы на эродированных склонах черноземов обыкновенных Ростовской области // *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2017. № 5(67). С. 39–41.
11. *Кутовая О.В., Тхакахова А.К., Чевердин Ю.И.* Влияние поверхностного переувлажнения на биологические свойства лугово-черноземных почв Каменной Степи // *Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева*. 2016. № 82. С. 56–70. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2016-82-56-70>
12. *Кутовая О.В., Гребенников А.М., Тхакахова А.К., Исаев В.А., Гармашов В.М., Беспалов В.А., Чевердин Ю.И., Белобров В.П.* Изменение почвенно-биологических процессов и структуры микробного сообщества агрочерноземов при разных способах обработки почвы // *Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева*. 2018. № 92. С. 35–61. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2018-92-35-61>
13. *Кутовая О.В., Тхакахова А.К., Семенов М.В., Чернов Т.И., Ксенофонтова Н.А., Железова А.Д., Гаджиумаров Р.Г., Стукалов Р.С., Иванова Е.А., Никитин Д.А.* Сравнительная оценка влияния нулевой и традиционной обработки на биологическую активность агрочерноземов Ставропольского края // *Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева*. 2019. № 100. С. 92–116. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2019-100-92-116>
14. *Мельников А.В., Железова С.В.* Традиционная вспашка или нулевая технология – что выгоднее для производства озимой пшеницы в нечерноземной зоне России? // *Theor. Appl. Problems Agro-industry*. 2019. № 39(1). С. 35–40.
15. *Методы почвенной микробиологии и биохимии* / Под ред. Звягинцева Д.Г. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1991. С. 304.
16. *Орлова Л.В., Шакиров Ф.К., Парвицкий С.А.* Инновационные технологии в земледелии: опыт применения, оценка эффективности // *Экономика сельскохозяйственных и перерабатывающих предприятий*. 2009. № 1. С. 19–21.
17. *Практикум по микробиологии* / Под ред. Егорова Н.С. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1976. С. 307.
18. *Семенов В.М., Когут Б.М.* Почвенное органическое вещество. М., 2015. 233 с.
19. *Семенов М.В., Манучарова Н.А., Краснов Г.С., Никитин Д.А., Степанов А.Л.* Биомасса и таксономическая структура микробных сообществ в почвах

- правобережья р. Оки // Почвоведение. 2019. № 8. С. 974–985.
20. Семенов М.В., Никитин Д.А., Степанов А.Л., Семенов В.М. Структура бактериальных и грибных сообществ ризосферного и внекорневого локусов сеярой лесной почвы // Почвоведение. 2019. № 3. С. 355–369.  
<https://doi.org/10.1134/S0032180X19010131>
  21. Теннер Е.З., Шильникова В.К., Переверзева Г.И. Практикум по микробиологии. М.: Дрофа, 2005. 256 с.
  22. Турусов В.И., Гармашов В.М., Нужная Н.А. Засоренность посевов при разных приемах и системах основной обработки почвы в севообороте // Защита и карантин растений. 2017. № 9. С. 19–21.
  23. Фаизова В.И., Цховребов В.С., Калугин Д.В., Никифорова А.М. Влияние распашки черноземов Центрального Предкавказья на численность аммонификаторов // Вестник АПК Ставрополя. 2013. № 4. С. 198–202.
  24. Шарков И.Н. Концепция воспроизводства гумуса в почвах // Агрохимия. 2011. № 12. С. 21–27.
  25. Berendsen R.L., Pieterse C.M., Bakker P.A. The rhizosphere microbiome and plant health // Trends Plant Science. 2012. V. 17(8). P. 478–486.  
<https://doi.org/10.1016/j.tplants.2012.04.001>
  26. De Bruijn F.J. Biological nitrogen fixation // Principles of Plant-Microbe. Springer, Cham. 2015. P. 215–224.  
[https://doi.org/10.1007/978-3-319-08575-3\\_23](https://doi.org/10.1007/978-3-319-08575-3_23)
  27. Delgado A., Gómez J.A. The soil. Physical, chemical and biological properties // Principles of Agronomy for Sustainable Agriculture. Springer, Cham. 2016. P. 15–26.  
[https://doi.org/10.1007/978-3-319-46116-8\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-46116-8_2)
  28. Domsch K.H., Gams W., Anderson T.-H. Compendium of soil fungi. Ed. Gams W. Eching: IHW-Verlag, 2007. P. 627.
  29. Fernandez A.L., Fabrizzi K.P., Tautges N.E., Lamb J.A., Sheaffer C.C. Cutting management and alfalfa stand age effects on organically grown corn grain yield and soil N availability // Renewable Agriculture and Food Systems. 2019. V. 34(2). P. 144–154.  
<https://doi.org/10.1017/S1742170517000394>
  30. Fu X., Wang J., Sainju U.M., Zhao F., Liu W. Soil microbial community and carbon and nitrogen fractions responses to mulching under winter wheat // Appl. Soil Ecol. 2019. V. 139. P. 64–68.  
<https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2019.03.018>
  31. Gardener B.B.M., Weller D.M. Changes in populations of rhizosphere bacteria associated with take-all disease of wheat // Appl. Environ. Microbiol. 2001. V. 67(10). P. 4414–4425.  
<https://doi.org/10.1128/AEM.67.10.4414-4425.2001>
  32. Garrett S.D. Soil fungi and soil fertility: an introduction to soil mycology. Elsevier: Pergamon press, 2016. 147 p.
  33. Geddes B.A., Ryu M.H., Mus F., Costas A.G., Peters J.W., Voigt C.A., Poole P. Use of plant colonizing bacteria as chassis for transfer of N<sub>2</sub>-fixation to cereals // Current Opinion in Biotechnology. 2015. V. 32. P. 216–222.  
<https://doi.org/10.1016/j.copbio.2015.01.004>
  34. Geisseler D., Scow K.M. Long-term effects of mineral fertilizers on soil microorganisms – A review // Soil Biol. Biochem. 2014. V. 75. P. 54–63.  
<https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2014.03.023>
  35. Glushakova A.M., Kachalkin A.V., Chernov I.Yu. Specific features of the dynamics of epiphytic and soil yeast communities in the thickets of Indian balsam on mucky gley soil // Eurasian Soil Science. 2011. V. 44. P. 886–892.  
<https://doi.org/10.1134/S1064229311080059>
  36. Graf D.R., Zhao M., Jones C.M., Hallin S. Soil type overrides plant effect on genetic and enzymatic N<sub>2</sub>O production potential in arable soils // Soil Biol. Biochem. 2016. V. 100. P. 125–128.  
<https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2016.06.006>
  37. Gras C., Hernandez V. Development models and technological innovation. A conservative revolution // Mundo Agrario. 2016. P. 17(36).
  38. Grebenikova N., Korshunov A., Savchenko I., Marques M. Root rot grain crops on Cereals caused by the phytopathogenic fungi // MATEC Web of Conferences. EDP Sciences. 2018. V. 245. P. 11006.  
<https://doi.org/10.1051/mateconf/201824511006>
  39. Gregory P. Plant roots. John Wiley & Sons, Limited, 2007.  
<https://doi.org/10.1002/9780470995563>
  40. Grigar J., Hatfield J.L., Reeder R. Transitional no-till: What is it and how does it differ from ‘true’ no-till? // Crops and Soils. 2018. V. 51(6). P. 28–36.  
<https://doi.org/10.2134/cs2018.51.0603>
  41. Hammer O., Harper A.T.D., Ryan P.D. PAST: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis // Palaeontologia Electronica. 2001. V. 4(1). P. 1–9.
  42. Irawan B., Afandi A., Hadi S. Effects of saprophytic microfungi application on soil fertility based on their decomposition properties // J. Appl. Biol. Sci. 2017. V. 2. P. 15–19.
  43. Korvigo I.O., Pershina E.V., Ivanova E.A., Matyuk N.S., Savos'kina O.A., Chirak E.L. et al. Effect of long-term application of agrotechnical techniques and crops on soil microbial communities // Microbiology. 2016. V. 85(2). P. 231–242.  
<https://doi.org/10.1134/S0026261716020107>
  44. Legrand F., Picot A., Cobo-Díaz J.F., Carof M., Chen W., Le Floch G. Effect of tillage and static abiotic soil properties on microbial diversity // Appl. Soil Ecol. 2018. V. 132. P. 135–145.  
<https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2018.08.016>
  45. Lourenço K.S., Rossetto R., Vitti A.C., Montezano Z.F., Soares J.R., de Melo Sousa R. et al. Strategies to mitigate the nitrous oxide emissions from nitrogen fertilizer applied with organic fertilizers in sugarcane // Sci. Total Environ. 2019. V. 650. P. 1476–1486.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.037>
  46. Marinkovic J., Bjelic D., Tintor B., Miladinovic J., Dukic V., Dorđevic V. Effects of soybean co-inoculation with plant growth promoting rhizobacteria in field trial // Romanian Biotechnol. Lett. 2018. V. 23(2). P. 13401.
  47. Rainbow R., Derpsch R. Advances in no-till farming technologies and soil compaction management in rainfed farming systems // Rainfed Farming Systems. Springer, Dordrecht, 2011. P. 991–1014.  
[https://doi.org/10.1007/978-1-4020-9132-2\\_39](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-9132-2_39)

48. *Sasse J., Martinoia E., Northen T.* Feed your friends: do plant exudates shape the root microbiome? // *Trends Plant Sci.* 2018. V. 23(1). P. 25–41.  
<https://doi.org/10.1016/j.tplants.2017.09.003>
49. *Schmidt R., Mitchell J., Scow K.* Cover cropping and no-till increase diversity and symbiotroph: saprotroph ratios of soil fungal communities // *Soil Biol. Biochem.* 2019. V. 129. P. 99–109.  
<https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.11.010>
50. *Semenov M., Blagodatskaya E., Stepanov A., Kuz'yakov Y.* DNA-based determination of soil microbial biomass in alkaline and carbonaceous soils of semi-arid climate // *J. Arid Environ.* 2018. V. 150. P. 54–61.  
<https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2017.11.013>
51. *Shukla S.K., Yadav R.L., Awasthi S.K., Gaur A.* Soil microbial biomass nitrogen, in situ respiration and crop yield influenced by deep tillage, moisture regimes and N nutrition in sugarcane-based system in subtropical India // *Sugar Tech.* 2017. V. 19(2). P. 125–135.  
<https://doi.org/10.1007/s12355-016-0442-1>
52. *Teotia P., Kumar V., Kumar M., Shrivastava N., Varma A.* Rhizosphere Microbes: Potassium Solubilization and Crop Productivity—Present and Future Aspects // Potassium solubilizing microorganisms for sustainable agriculture. Springer, New Delhi, 2016. P. 315–325.  
[https://doi.org/10.1007/978-81-322-2776-2\\_22](https://doi.org/10.1007/978-81-322-2776-2_22)
53. *Van Agtmaal M., Straathof A.L., Termorshuizen A., Lievens B., Hoffland E., de Boer W.* Volatile-mediated suppression of plant pathogens is related to soil properties and microbial community composition // *Soil Biol. Biochem.* 2018. V. 117. P. 164–174.  
<https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2017.11.015>
54. *Vlasova O.I., Perederieva V.M., Volters I.A., Tivikov A.I., Trubacheva L.V.* Change in microbiological activity under the effect of biological factors of soil fertility in the Central Fore-Caucasus chernozems // *Biol. Medicine.* 2015. V. 7(5). P. 2.
55. *Wang S., Li C., Copeland L., Niu Q., Wang, S.* Starch retrogradation: A comprehensive review // *Comprehensive Rev. Food Sci. Food Safety.* 2015. V. 14(5). P. 568–585.  
<https://doi.org/10.1111/1541-4337.12143>
56. *Yin C., Mueth N., Hulbert S., Schlatter D., Paulitz T.C., Schroeder K. et al.* Bacterial communities on wheat grown under long-term conventional tillage and no-till in the Pacific Northwest of the United States // *Phyto-biomes.* 2017. V. 1(2). P. 83–90.  
<https://doi.org/10.1094/PBIOMES-09-16-0008-R>

## Assessment of Impact of No-Till Technology and Ploughing on Microbiome of Southern Agrochernozems

**D. A. Nikitin<sup>1, \*</sup>, E. A. Ivanova<sup>1</sup>, A. D. Zhelezova<sup>1</sup>, M. V. Semenov<sup>1</sup>, R. G. Gadzhumarov<sup>2</sup>,  
A. K. Tkhakakhova<sup>1</sup>, T. I. Chernov<sup>1</sup>, N. A. Xenofontova<sup>1</sup>, and O. V. Kutovaya<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Dokuchaev Soil Science Institute, Moscow, 119017 Russia*

<sup>2</sup>*North-Caucasian Federal Scientific Agrarian Center, Stavropol Territory, Mikhailovsk, 356241 Russia*

*\*e-mail: dimnik90@mail.ru*

The estimates of quantitative microbial indicators in southern agrochernozems of Stavropol region, exposed to no-till technology and traditional ploughing under different agricultural crops and fertilization patterns, are presented. The number of ecological-trophic groups of microorganisms (nitrogen fixers, ammonifiers, denitrifiers, amylolytics, cellulolytics) was estimated by a classical method of sowing on elective media (plate counting), and the number of copies of ribosomal genes of archaea, bacteria and fungi was determined using real-time PCR. The number of cultured aerobic ammonifiers, denitrifiers, aerobic cellulolytics, actinomycetes, and micromycetes increased under ploughing, while direct seeding (no-till) resulted in an increase in anaerobic cellulolytics and nitrogen fixers, aerobic diazotrophes and amylolytics. Ammonifiers and amylolytics were stimulated by maize, aerobic nitrogen fixers and aerobic cellulolytics by soybean; denitrifiers and anaerobic cellulolytics by sunflower plants, respectively. The maximal number of copies of bacterial and fungal ribosomal genes was found on no-till plots and in long-term fallows, while that of archaeal ones only in the fallows. The data obtained indicate a different degree of severity and direction of the soil-biological processes of agrochernozems under application of no-till technology in the cultivation of major crops.

**Keywords:** PCR-Real Time, bacteria, archaea, actinomycetes, micromycetes, No-till

АГРОХИМИЯ  
И ПЛОДОРОДИЕ ПОЧВ

УДК 631.417.2631.452631.559631.815.2631.454

ВЛИЯНИЕ СИСТЕМ УДОБРЕНИЯ НА СОДЕРЖАНИЕ ПОЧВЕННОГО  
ОРГАНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА И УРОЖАЙНОСТЬ  
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР: РЕЗУЛЬТАТЫ ДЛИТЕЛЬНЫХ  
ПОЛЕВЫХ ОПЫТОВ ГЕОГРАФИЧЕСКОЙ СЕТИ РОССИИ

© 2020 г. В. Г. Сычев<sup>а</sup>, А. Н. Налиухин<sup>а, \*</sup>, Л. К. Шевцова<sup>а</sup>, О. В. Рухович<sup>а</sup>, М. В. Беличенко<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии имени Д.Н. Прянишникова,  
ул. Прянишникова, 31а, Москва, 127434 Россия

\*e-mail: naliuhin@yandex.ru

Поступила в редакцию 11.12.2019 г.

После доработки 16.05.2020 г.

Принята к публикации 27.05.2020 г.

Представлены результаты 21-го длительного опыта Географической сети России, проводимого на основных типах почв: дерново-подзолистых (Retisols, Luvisols and Podzols), серых лесных (Luvic Greyzemic Phaeozem), черноземах (Chernozems), каштановых (Kastanozems), лугово-бурых (Albic Stagnic Luvisol) и лугово-черноземовидных (Luvic Greyzemic Stagnic Phaeozem) с широким географическим охватом с севера на юг европейской части России, а также на восток, включая Сибирь, Бурятию и юг Дальнего Востока: Амурскую область, Хабаровский и Приморский края. Стационарные эксперименты имеют продолжительность 20–45 лет, 10 – от 50 до 81 года. Выявлено, что органо-минеральная система удобрения по действию на урожайность превосходила минеральную на 1–40% в 18-ти опытах, а минеральная была на 2–3% эффективнее органо-минеральной системы в трех опытах. Установлено, что в пределах одного типа почв различия в содержании  $C_{\text{орг}}$  в удобренных вариантах составляли 0.56–1.55% для дерново-подзолистых почв и 1.58–3.93% для черноземов. Достоверные различия в содержании почвенного органического углерода между вариантами без удобрения и навоз + NPK в четырех опытах были <10 отн. %, в шести – 11–20%, в десяти – более 20% (средняя величина составила 0.27%). Определены уровни минимального и оптимального содержания углерода, которые можно принять как эталонные для каждого типа почв и разновидности по гранулометрическому составу с учетом применяемой системы удобрения.

**Ключевые слова:** Географическая сеть опытов с удобрениями, эффективность систем удобрений, различные типы почв, минимальное содержание углерода, оптимальное содержание углерода

**DOI:** 10.31857/S0032180X20120138

## ВВЕДЕНИЕ

В мире проводится более 600 длительных полевых опытов с удобрениями, которые охватывают почти все типы почв и климатические условия. Длительные стационарные эксперименты являются уникальной основой для исследований эффективности удобрений, их влияния на почвенное плодородие, урожайность и качество сельскохозяйственных культур [38, 41]. Большое разнообразие почвенных, климатических и погодных условий России, а также огромная изменчивость агрохимических свойств почв в пространстве и времени требуют всесторонних исследований в регионах страны в течение длительного времени. Такие исследования проводятся в рамках Географической сети опытов с удобрениями, головным координатором которых является Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии имени Д.Н. Прянишникова (Геосеть ВНИИА). В состав

Геосети входят 65 научных и учебных учреждений, проводящих около 130 длительных полевых опытов с удобрениями (почти 1/5 от всех опытов в мире). Более половины из них продолжается свыше 35 лет, 15 – более 70 лет. По территории России опыты распределены следующим образом: наибольшее количество сосредоточено в Нечерноземной зоне и Приволжском федеральном округе. В Сибирском федеральном округе – 20 аттестованных длительных опытов, Уральском федеральном округе – семь, на Дальнем Востоке – три опыта [29].

В рамках Геосети решаются вопросы, которые не могут быть изучены в краткосрочных полевых экспериментах:

– возможность устойчивого функционирования агроэкосистем при длительном сельскохозяйственном использовании;

- эффективность систем удобрений (органической, минеральной, органо-минеральной) на различных типах почв в условиях изменяющегося климата и экстремальных погодных условиях;
- поддержание исходного содержания гумуса при применении традиционных систем удобрения;
- изучение длительной временной динамики гумуса и азота в зависимости от применяемых систем земледелия;
- влияние комплексного применения удобрений и пестицидов на вредителей и фитопатогенов сельскохозяйственных культур при изменении климата и введении новых сортов и гибридов;
- изучение взаимодействия между почвой, растениями и удобрениями в процессе возделывания сельскохозяйственных культур;
- проверка моделей эффективности ведения систем земледелия в рамках длительных стационарных исследований.

В последние два десятилетия в длительных полевых опытах в России и в мире дается количественная оценка динамики содержания углерода и азота в почве, разрабатываются методы достижения бездефицитного баланса гумуса. За последние 100 лет среднегодовая температура на Земном шаре увеличилась на  $0.74^{\circ}\text{C}$ , что делает исследования длительных опытов особенно ценными. На основании продолжительного временного тренда можно сделать ретроспективный анализ изменения гумусового состояния почв и разработать мероприятия по недопущению их дегумификации [24, 37, 40, 41].

Цель настоящей работы – изучение изменения почвенного органического углерода ( $C_{\text{орг}}$ ) при применении различных систем удобрения на разных типах почв, а также определение скорости изменения  $C_{\text{орг}}$  в контрастных вариантах в длительных опытах Геосети; выявление географических закономерностей эффективности удобрений на основных типах почв России.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Из длительных стационарных опытов, проводимых в рамках Геосети России, включающих органическую, минеральную и органо-минеральную системы удобрений, уравновешенных по действующему веществу, выбрали 21 опыт. В качестве контроля использовали вариант без внесения удобрений.

Опыты заложены на основных типах почв: дерново-подзолистых (Retisols, Luvisols and Podzols), серых лесных (Luvic Greyzemic Phaeozem), черноземах (Chernozems), каштановых (Kastanozems), лугово-бурых (Albic Stagnic Luvisol) и лугово-черноземовидных (Luvic Greyzemic Stagnic Phaeozem) (табл. 1).

Мы представляем результаты длительных полевых опытов с широким географическим охватом: с севера (Тверская область) на юг (Краснодарский край), на восток, включая Сибирь, Бурятию и юг Дальнего Востока: Амурскую область, Хабаровский и Приморский края.

Большинство (11 опытов) заложены в период 1964–1993 гг., 10 опытов имеют продолжительность от 50 до 81 года. Все эксперименты, за исключением Москвы (Долгопрудная агрохимическая опытная станция), являются действующими. Результаты исследований приводятся по материалам, полученным в первые два десятилетия XXI в.

Длительные стационарные опыты заложены на трех последовательно вводимых полях, что позволяло оценить воздействие удобрений на урожайность каждой культуры за три года в одной ротации севооборота. В ряде опытов исследования ведутся на одном севооборотном поле. Некоторые эксперименты развернуты в пространстве и во времени на всех полях севооборота.

Среднегодовая температура колебалась от  $0.8$  (Амурская область, Благовещенск) до  $10.9^{\circ}\text{C}$  (Краснодарский край) при годовом количестве осадков от 242.3 (республика Бурятия) до 696 мм (Смоленская область). Следовательно, амплитуда колебаний температуры составляла 13.6 раз, осадков – 2.9 раза. Подробная характеристика опытов представлена в табл. 1, 2.

С каждой делянки с помощью тростьевого бура из пахотного слоя почвы (0–20 см) отбирали 15–20 индивидуальных образцов, проходя посередине, вдоль длинной стороны делянки, для составления смешанного образца. Повторность – трех-четырёхкратная. Отбор образцов проводили осенью, после завершения ротации севооборота. Во всех исследованиях содержание  $C_{\text{орг}}$  в почве определяли окислением органического вещества бихроматным методом И.В. Тюрина. Различия в изменении содержания  $C_{\text{орг}}$  в почве длительных опытов статистически обрабатывали (Multifactor analysis of variance ANOVA) с последующей оценкой достоверности между вариантами при  $p < 0.05$ .

Ссылки на оригинальные статьи руководителей и соисполнителей стационарных полевых опытов с удобрениями Геосети ВНИИА приводятся в табл. 1.

Урожайность культур севооборотов для унификации обобщения материалов приведена в центнерах зерновых единиц (з. е.) на 1 га.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

**Урожайность.** За последние 30 лет урожайность сельскохозяйственных культур, как в полевых опытах, так и на землях сельхозпредприятий увеличилась в два раза. Во многом это связано с

Таблица 1. Краткая характеристика длительных опытов

Учреждение Геосети, место проведения опыта	Год закладки	Почва	Гранулометрический состав	Среднегодовая температура, °С	Годовое количество осадков, мм (среднее)
ЦОС ВНИИА, Московская область [1]	1960	Дерново-среднеподзолистая на тяжелом покровном суглинке, Albic Glossic Retisol (Loamic, Agic, Cutanic, Differentic, Ochric)	Тяжелосуглинистый	3.8	575
ВНИИ льна, Торжок, Тверская область [13]	1948	Дерново-среднеподзолистая супесчаная на карбонатном моренном суглинке, Albic Luvisol (Eriapenic, Endoloamic, Agic, Cutanic, Ochric, Raptic)	Супесчаный	3.8	613
ДАОС, Москва [16]	1931	Дерново-среднеподзолистая на тяжелом покровном суглинке, Albic Glossic Retisol (Loamic, Agic, Cutanic, Differentic, Ochric)	Тяжелосуглинистый	4.5	578
Курганский НИИСХ [8]	1970	Чернозем выщелоченный, Luvis Chernozem (Loamic, Agic, Tongic)	Тяжелосуглинистый	3.0	477
Пермский НИИСХ [12]	1968	Дерново-мелкоподзолистая на покровном суглинке, Glossic Retisol (Loamic, Agic, Cutanic, Ochric)	Тяжелосуглинистый	1.5	609
ВНИИ кормов [14]	1947	Дерново-среднеподзолистая, Albic Glossic Retisol (Loamic, Agic, Cutanic, Differentic, Ochric)	Среднесуглинистый	3.2	600
ВНИИ сахарной свеклы и сахара им. А.Л. Мазулова, Воронежская область [21, 22]	1936	Чернозем выщелоченный малогумусный среднемощный на тяжелом карбонатном суглинке, Luvis Chernozem (Loamic, Agic, Raptic)	Тяжелосуглинистый	5.6	501
Владимирский НИИСХ, Владимирская область [23]	1993	Серая лесная обычная на лёссовидном карбонатном суглинке, Luvis Greyzem Phaeozem (Loamic, Agic)	Среднесуглинистый	3.4	604
ВНИИОУ, Владимирская область [17]	1968	Дерново-сильноподзолистая, слабogleеватая, подстилаемая моренным суглинком, Albic Endostagnic Luvisol (Eriapenic, Endoloamic, Agic, Cutanic, Ochric, Raptic)	Супесчаный	4.2	627
Белгородский НИИСХ [32]	1987	Чернозем типичный среднемощный малогумусный на лёссовидном суглинке, Naplic Chernozem (Loamic, Agic, Raptic)	Среднесуглинистый	6.3	529
Бурятский НИИСХ, Улан-Удэ, республика Бурятия [5, 33]	1967	Каштановая мучнисто-карбонатная, типичная на пролювиально-делювиальных супесчаных отложениях, Naplic Kastanozem (Loamic, Agic)	Легкосуглинистый	2.0	242
Сибирский НИИСХ, Омск [9]	1987	Чернозем выщелоченный среднемощный среднегумусный на аллювиальных средних суглинках, Luvis Chernozem (Loamic, Agic, Raptic)	Тяжелосуглинистый	1.0	363

Таблица 1. Окончание

Учреждение Геосети, место проведения опыта	Год закладки	Почва	Гранулометрический состав	Среднегодовая температура, °С	Годовое количество осадков, мм (среднее)
Институт сельского хозяйства БНЦ РАН, г. Нальчик [4, 16]	1948	Чернозем обыкновенный карбонатный на мицелярно-карбонатном лессовидном суглинке, <i>Haplic Chernozem (Loamic, Aric)</i>	Тяжелосуглинистый	10.1	451
Дальневосточный НИИСХ, юг Дальнего Востока, Хабаровский р-н, Хабаровский край [25]	1965	Лугово-бурая оподзоленная, <i>Albic Stagnic Luvisol (EpiLoamic, Katoclayic, Aric, Cutanic, Ochric)</i>	Тяжелосуглинистый	2.4	704
Всероссийский НИИ сои, юг Дальнего Востока, Амурская область [27]	1964	Лугово-черноземовидная среднетощая тяжелосуглинистая на покровных глинах, <i>Luvic Greyzemic Stagnic Phaeozem (Loamic, Aric, Pachic)</i>	Тяжелосуглинистый	0.8	480
Приморский НИИСХ, юг Дальнего Востока, Приморского края [31]	1941	Лугово-бурая отбеленная на озерно-аллювиальных отложениях, <i>Albic Stagnic Luvisol (EpiLoamic, Katoclayic, Aric, Cutanic, Ochric)</i>	Тяжелосуглинистый	3.0	626
Новозыбковская государственная сельскохозяйственная опытная станция ВНИИ люпина [2]	1993	Дерново-подзолистая песчаная, на древнеаллювиальной супеси, подстилаемой связным песком (флювиогляциальные отложения), <i>Albic Podzol (Arenic, Aric)</i>	Песчаный	6.2	582
Ижевская ГСХА, г. Ижевск, Удмуртской Республики [6]	1979	Дерново-среднеподзолистая на красно-буром опесчанном суглинке, <i>Albic Retisol (Loamic, Aric, Cutanic, Differentic, Ochric)</i>	Среднесуглинистый	2.1	500
Смоленский НИИСХ, Смоленская область [19]	1978	Дерново-подзолистая на морене, <i>Albic Glossic Retisol (Loamic, Aric, Cutanic, Differentic, Ochric)</i>	Легкосуглинистый	5.3	696
ВНИИ агрохимии им. Д.Н. Прянишникова, стационар Шебанцево [18]	1964	Дерново-среднеподзолистая на тяжелом покровном суглинке, <i>Albic Glossic Retisol (Loamic, Aric, Cutanic, Differentic, Ochric)</i>	Тяжелосуглинистый	3.8	575
Северо-Кубанская СХОС [28]	1978	Чернозем обыкновенный на лессовидном суглинке, <i>Haplic Chernozem (Loamic, Aric, Pachic)</i>	Тяжелосуглинистый	10.9	569

Примечание: НИИСХ – Научно-исследовательский институт сельского хозяйства; НИИ – научно-исследовательский институт; ВНИИ – Всероссийский научно-исследовательский институт; ГСХА – Государственная сельскохозяйственная академия; СХОС – сельскохозяйственная опытная станция; ЦОС ВНИИА – Центральная опытная станция Всероссийского научно-исследовательского института агрохимии имени Д.Н. Прянишникова; ДАОС – Долгопрудная агрохимическая опытная станция; КБНЦ РАН – Кабардино-Балкарский научный центр Российской академии наук.

Таблица 2. Влияние различных систем удобрения на содержание  $C_{орг}$  в длительных стационарных опытах Геосети России

Место проведения опыта, учреждение Геосети	Год закладки	Период отбора образцов	Срок экспери- мента, лет	Содержание $C_{орг}$ , % от сухой почвы					ежегодное $\Delta C$
				контроль (без удобрений)	НРК	навоз	навоз + НРК	$\Delta C$ (max -min)	
Дерново-подзолистые почвы (Retisols, Luvisols and Podzols)									
Владимирская область	1968	2002	34	0.56	0.59	0.69	0.73	0.17*	0.0051
Брянская область	1993	2012	20	0.97	1.15	1.24	1.22	0.26*	0.0131
Тверская область	1948	2011	63	0.58	0.61	0.73	0.74	0.16*	0.0025
Смоленская область	1978	2015	37	1.00	1.20	1.00	1.20	0.20*	0.0054
Удмуртская республика	1979	2006	27	0.86	0.90	0.91	0.99	0.13*	0.0047
Московская область, ВНИИК	1947	2012	66	1.55	1.68	1.94	—	0.39*	0.0059
Москва, ДАОС	1931	2007	76	0.70	0.96	1.14	—	0.44*	0.0057
Пермский край	1968	2009	41	1.23	1.29	1.29	1.43	0.20*	0.0048
Московская область, ВНИИА	1960	2011	51	0.96	1.00	—	1.09	0.13*	0.0025
Московская область, СШ-5	1964	1992	28	0.75	0.75	0.87	0.93	0.17*	0.0063
В среднем								0.23	0.0056
Серые лесные почвы (Luvic Greyzemic Phaeozem)									
Владимирская область	1993	2014	21	1.68	1.83	1.89	2.06	0.38*	0.0182
Черноземы выщелоченные, обыкновенные, типичные (Chernozems)									
Курганская область	1970	2007	37	3.11	3.03	3.07	3.11	0.00	0.0000
Омск	1987	2008	21	3.93	4.05	4.04	4.16	0.24*	0.0113
Нальчик на богаре при орошении	1948	2015	67	1.61	1.82	—	2.14	0.53*	0.0079
Воронежская область	1936	2017	81	1.58	1.76	—	1.90	0.32*	0.0048
Краснодарский край	1978	2005	27	2.84	3.25	—	3.32	0.48*	0.0059
Белгородская область	1987	2015	28	2.20	2.34	—	2.35	0.15*	0.0054
Среднее				2.90	2.92	3.11	3.13	0.22*	0.0079
Каштановые почвы (Kastanozems)									
Бурятский, Улан-Удэ	1967	2017	50	0.50	0.61	0.82	0.70	0.20*	0.0039
Лугово-бурые почвы (Albic Stagnic Luvisol)									
Хабаровский край без известкования с известкованием	1965	2015	50	1.97	2.26	2.38	2.38	0.40*	0.0081
Приморский край	1941	2014	73	2.09	2.32	2.55	2.44	0.46*	0.0093
В среднем				1.72	1.88	—	1.99	0.27*	0.0037
Лугово-черноземовидные почвы (Luvic Greyzemic Stagnic Phaeozem)									
Амурская область	1964	2013	45	2.32	2.20	—	2.44	0.12*	0.0026
Среднее по опытам (средняя продолжительность опытов 36 лет, от 20 до 81 года)								0.27	0.0067

\* Достоверные изменения содержания и запасов  $C_{орг}$  при  $p < 0.05$  указаны по данным работ авторов, приведенных в табл. 1.

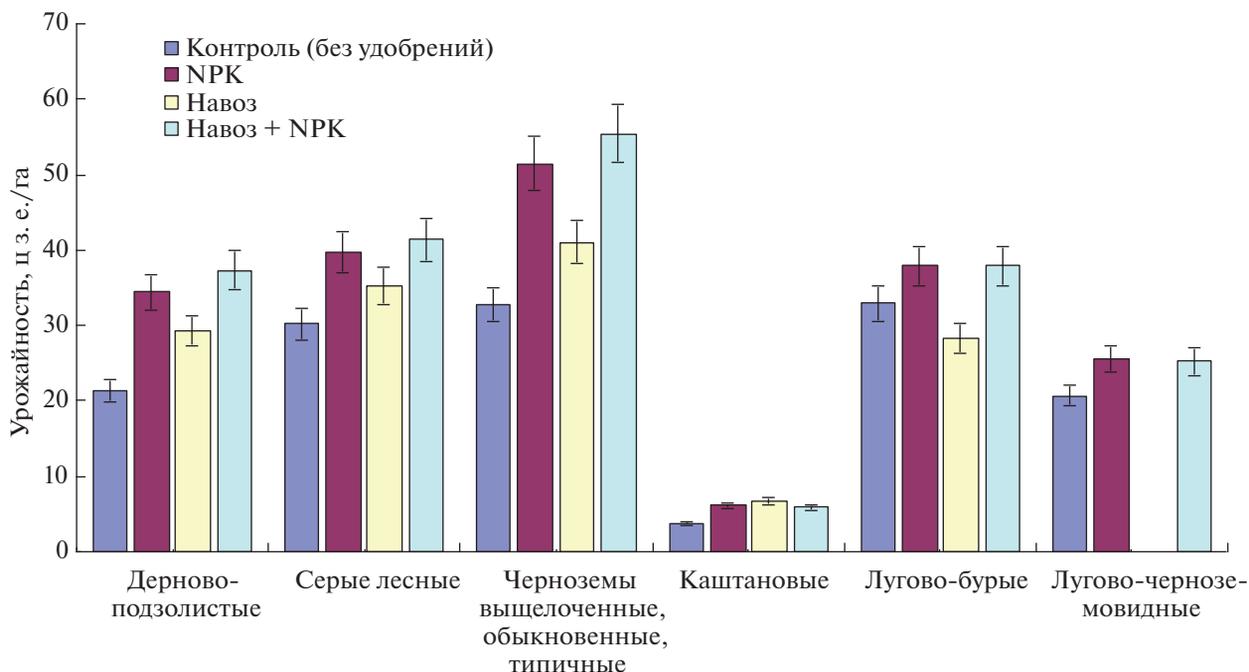


Рис. 1. Эффективность минеральной, органической и органо-минеральной систем удобрения на разных типах почв в длительных опытах Геосети России (обобщенные данные по 21 опыту).

применением средств защиты растений (фунгициды, инсектициды, гербициды и др.), регуляторов роста растений, а также с успехами селекционеров в создании высокоинтенсивных сортов, отзывчивых на применение удобрений. Многие длительные опыты демонстрируют положительную динамику продуктивности севооборотов, окупаемости удобрений урожайностью культур и улучшение основных показателей плодородия почв.

Например, в 51-летнем опыте Центральной опытной станции ВНИИ агрохимии на дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почве без применения химических средств защиты растений продуктивность севооборота без удобрений составляла всего 30.4, а при органо-минеральной системе удобрения – 39.7 ц з. е./га. Дополнительное использование гербицидов, фунгицидов и ретардантов повысило продуктивность севооборота на 13.1 ц з. е./га [1]. В Кабардино-Балкарском научном центре РАН на черноземе обыкновенном карбонатном тяжелосуглинистом без внесения удобрений на богаре продуктивность севооборота составила 19.2 ц з. е./га. На фоне орошения совместное внесение навоза с  $N_{44}P_{42}K_{24}$  способствовало последовательному увеличению продуктивности севооборота в 2.6 раза до 49.9 ц з. е./га в 2010–2016 гг. [3, 4]. Аналогичные результаты получены и на других стационарных опытах.

Анализируя влияние удобрений на урожайность культур и продуктивность севооборотов в длительных стационарных опытах, можно выделить следующие зональные особенности.

По мере продвижения с севера на юг европейской части России увеличивается теплообеспеченность, что наряду с ростом гумусированности почв ведет к повышению урожайности сельскохозяйственных культур. Если на дерново-подзолистых почвах среднегодовая продуктивность севооборотов в неудобранных вариантах составляла 21.3 ц з. е./га, на серых лесных – 30.2, то на черноземах – 32.7 ц з. е./га (рис. 1).

Во всех опытах минеральная система удобрения имела преимущество над органической. Наибольший эффект от NPK по сравнению с внесением навоза (+25%) отмечен в опытах, проведенных на почвах с большим содержанием почвенного органического углерода (черноземах), наименьший – на дерново-подзолистых и серых лесных (12–17%).

Органо-минеральная система обеспечивала наибольшую продуктивность севооборотов: 55.4 ц з. е./га на черноземах выщелоченных, обыкновенных, южных, 41.4 – на серых лесных и 37.3 ц з. е./га на дерново-подзолистых почвах. При совместном внесении навоза и NPK урожайность по сравнению с контролем возрастала в среднем в 1.4–1.8 раза. Наибольшая разница по сравнению с неудобранным вариантом отмечена в опытах ВНИИ льна на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве – 215% от контроля [13]. В опыте на сеяном пастбище ВНИИ кормов за 39 лет наблюдений органо-минеральная система удобрения давала прибавку урожайности луговых трав более чем в 3 раза и превосходила по продуктивности органическую в 1.7 раза [14].

Такой же высокий уровень урожайности при совместном внесении органических и минеральных удобрений (307% от контроля) отмечался в длительном стационарном опыте ВНИИ сахарной свеклы и сахара на черноземе выщелоченном тяжелосуглинистом [21, 22]. В засушливых условиях Кабардино-Балкарии орошение способствовало повышению эффективности удобрений на 70% [3, 4].

В условиях сухой засушливой степи Забайкальского края в длительном стационарном опыте Бурятского НИИСХ, заложенном в 1967 г. на каштановой мучнисто-карбонатной среднетяжелой супесчаной почве, при систематической засухе урожайность пшеницы и овса была низкой (4.6–5.4 ц/га), овса на зеленую массу – 8.6 ц/га [7, 33]. В условиях засухи 2015–2017 гг., когда с мая по июль выпадало всего около 60 мм осадков, внесение навоза в дозе 20 т/га в чистом пару превосходило внесение эквивалентных доз минеральных удобрений на 11%, а органо-минеральных систем – на 15%.

На юге Дальнего Востока на лугово-черноземовидных и лугово-бурых почвах, составляющих основной массив пашни Дальневосточного региона, заложено три опыта, продолжительностью более 50 лет: в Амурской области, Хабаровском и Приморском краях. В опытах Всероссийского НИИ сои, Дальневосточного НИИСХ и Приморского НИИСХ в севооборотах с ведущей для данного региона культурой – соей – органо-минеральная система удобрения по продуктивности севооборота была равна минеральной. Следует отметить, что на лугово-бурых почвах Хабаровского края органическая система уступала как минеральной, так и органо-минеральной на 25%. Для Приморского и Хабаровского краев, характерен муссонный климат, с выпадением большого количества осадков за вегетационный период (527–556 мм). В Амурской области выпадает несколько меньшее, но достаточное количество осадков (390 мм за вегетацию). Продуктивность севооборотов с соей на лугово-черноземовидных почвах была на 34% меньше, чем лугово-бурых и составляла 20.7 в контроле и 25.2–25.6 ц з. е./га при минеральной и органо-минеральной системах удобрения [10, 25, 27, 31].

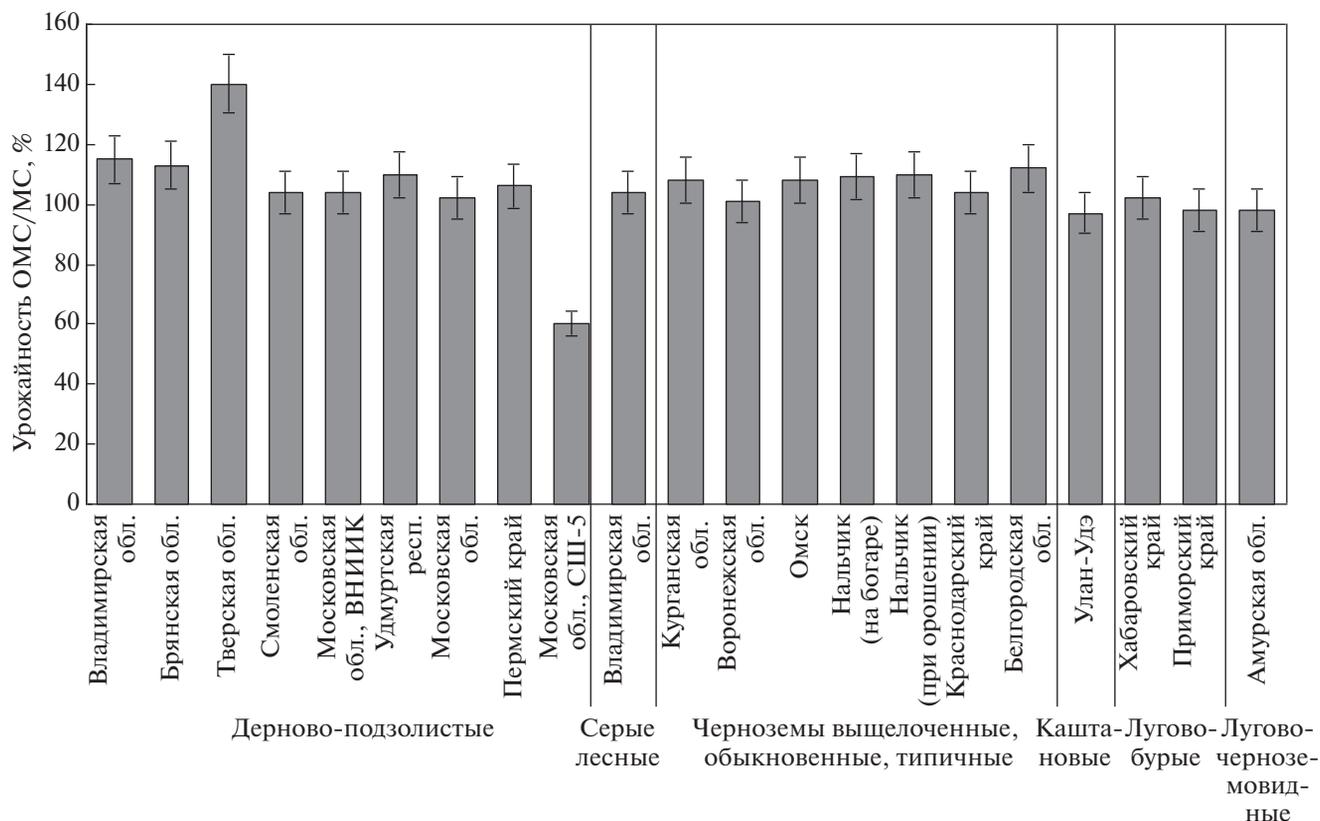
Следует отметить, что органо-минеральная система удобрения по действию на урожайность превосходила минеральную на 1–40% в 17 опытах, в то время как минеральная была эффективнее органо-минеральной на 2–3% в трех опытах и на 40% – в одном (возможно, это недостоверно) (рис. 2).

Можно выявить следующую закономерность в эффективности удобрений в различных почвенно-климатических зонах страны. В европейской части России продуктивность севооборотов увеличивается с севера на юг в ряду почв: дерново-

подзолистые < серые лесные < черноземы (выщелоченные, обыкновенные, южные). В этой зоне выделяется органо-минеральная система удобрений. В условиях сухой степи Забайкалья при остром дефиците влаги урожайность резко уменьшается, а наибольшая величина отмечается при раздельном внесении органических и минеральных удобрений. На юге Дальнего Востока более продуктивными являются лугово-бурые почвы по сравнению с лугово-черноземовидными. В условиях муссонного климата эффективность органо-минеральных систем удобрения равна минеральной.

**Содержание почвенного органического углерода ( $C_{орг}$ ), его динамика и баланс в длительных опытах Геосети.** Из-за большой вариабельности содержания  $C_{орг}$  в пространстве и времени существенные изменения гумусового состояния почв могут быть подтверждены только при систематическом анализе почвы в одних и тех же вариантах в течение длительного периода времени. Также представляется сомнительным сравнение содержания  $C_{орг}$  за короткий промежуток времени (3–5 лет). Необходимо изучать содержание  $C_{орг}$  в динамике, чтобы уловить направленность и темпы изменения почвенного органического вещества при изменении агротехники, способов обработки почв, сроков, способов и доз внесения удобрений. Именно поэтому проведение исследований в длительных опытах Геосети по единой методике служит объективной причиной для получения достоверных результатов по содержанию, динамике и балансу почвенного органического углерода.

На основе анализа данных, полученных в 21-м длительном полевом опыте Геосети ВНИИА, изучено влияние различных систем удобрения на содержание  $C_{орг}$  в почве (табл. 2). Результаты свидетельствуют о большом различии в содержании  $C_{орг}$  между опытами, которое изменялось в не-удобренных вариантах в диапазоне 0.50–3.93%. В пределах одного типа почв различия были значительно меньше и составляли 0.56–1.55% для дерново-подзолистых и 1.58–3.93 для черноземов. В 18 опытах наибольшая разница между минимальным и максимальным содержанием  $C_{орг}$  наблюдалась между контролем и органо-минеральной системой удобрения, в трех опытах – между контролем и органической системой. Достоверные различия в содержании почвенного органического углерода между вариантами без удобрения и навоз + НПК в четырех опытах были <10 отн. %, в шести различия составляли 15–20%, в десяти – более 20% (рис. 3). В среднем по 21 эксперименту, дифференциация между минимальным и максимальным содержанием  $C_{орг}$  на период отбора образцов составила 21 отн. % или 0.27 абс. %. Наименьшая вариация отмечена для



**Рис. 2.** Изменение урожайности в севооборотах при органо-минеральной системе удобрения (ОМС) на разных типах почв в сравнении с минеральной (NPK) системой (МС) (урожайность при применении МС взята за 100%, обобщенные данные по 21 опыту).

черноземов выщелоченных и лугово-черноземовидных почв.

Изменение  $C_{\text{орг}}$  в различных типах почв является важнейшим информативным показателем скорости прироста/убыли гумуса [20]. Несмотря на различия в генезисе почв, природно-климатических условиях, агротехнике и других факторах среднегодовые темпы прироста запасов  $C_{\text{орг}}$  между “контрастными” вариантами имели общие закономерности. В дерново-подзолистых, черноземах, лугово-бурых почвах темпы изменения запасов почвенного органического вещества в пахотном слое (0–20 см) составляли 0.14–0.16 т/год.

В каштановых и лугово-черноземовидных почвах изменение запасов  $C_{\text{орг}}$  было в 2 раза меньше. При этом в серых лесных почвах скорость прироста была наибольшей и составляла 0.49 т  $C_{\text{орг}}$ /год. Возможно, это связано с тем, что все системы удобрения изучаются на известкованном фоне.

Следует отметить, что, несмотря на повышение содержания органического вещества в почвах при применении органических удобрений и при их совместном внесении с минеральными, во многих экспериментах не удается сохранить исходное (до закладки) содержание  $C_{\text{орг}}$  (табл. 3,

рис. 4, 5). Анализ экспериментальных данных позволил выявить три разнонаправленные тенденции изменения  $C_{\text{орг}}$  по сравнению с исходным уровнем (перед закладкой опытов):

- уменьшение содержания  $C_{\text{орг}}$ ,
- сохранение содержания  $C_{\text{орг}}$ ,
- увеличение содержания  $C_{\text{орг}}$  по сравнению с первоначальным значением.

Например, в опыте ВНИИ льна, на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве, за 63-летний период наблюдений отмечается продолжающееся уменьшение содержания  $C_{\text{орг}}$  во всех вариантах опыта по сравнению с исходным, перед закладкой эксперимента. Особенно заметна (–0.55% или 14.85 т/га в пахотном слое 0–20 см, при  $p < 0.05$ ) убыль  $C_{\text{орг}}$  на контроле без внесения удобрений. Несмотря на дозы органических удобрений, рассчитанные на поддержание исходного уровня содержания почвенного органического вещества, его величина не стабилизировалась до настоящего времени. Особенно сильное уменьшение содержания и запасов гумуса, по данным [13], произошло в третьей ротации льняного севооборота, когда было проведено углубление пахотного слоя с припахиванием

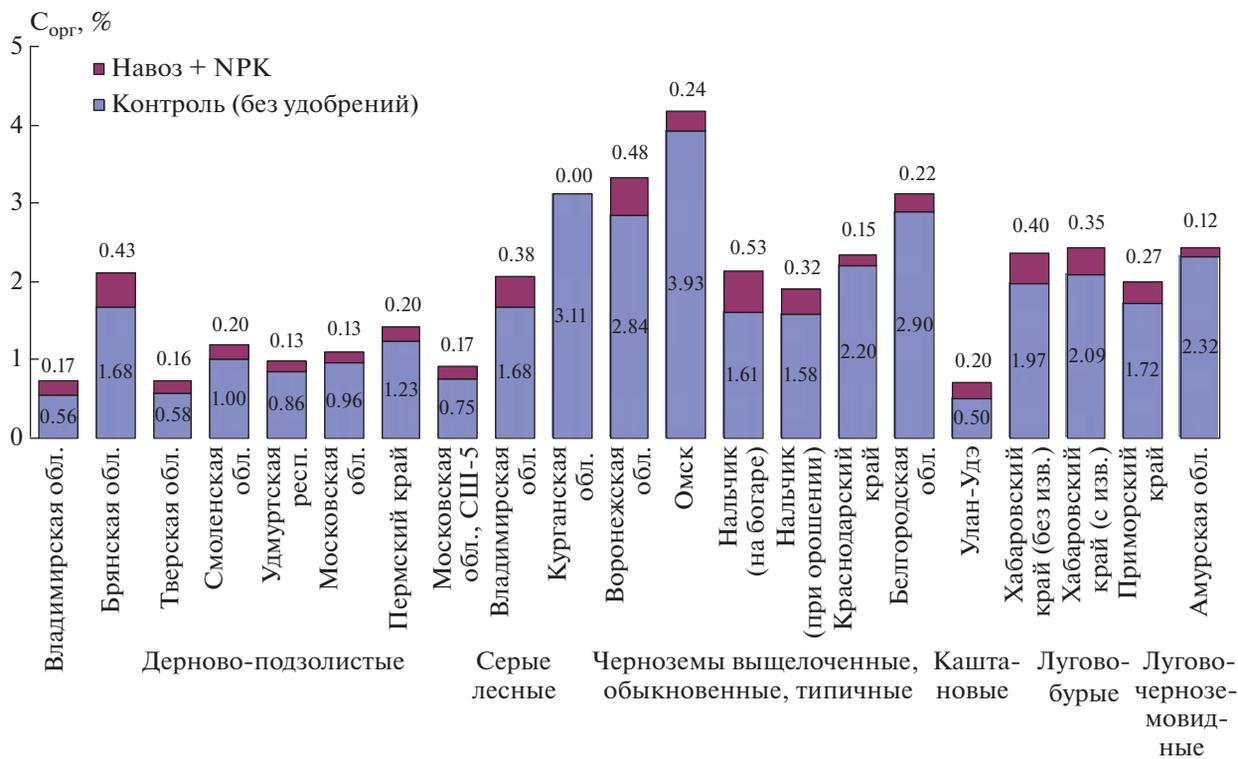


Рис. 3. Накопление  $C_{орг}$  в почвах длительных опытах Геосети при органо-минеральной системе удобрения по сравнению с контролем. Розовым цветом показан прирост почвенного органического вещества в варианте с органо-минеральной системой, % от неудобрённого варианта (контролю).

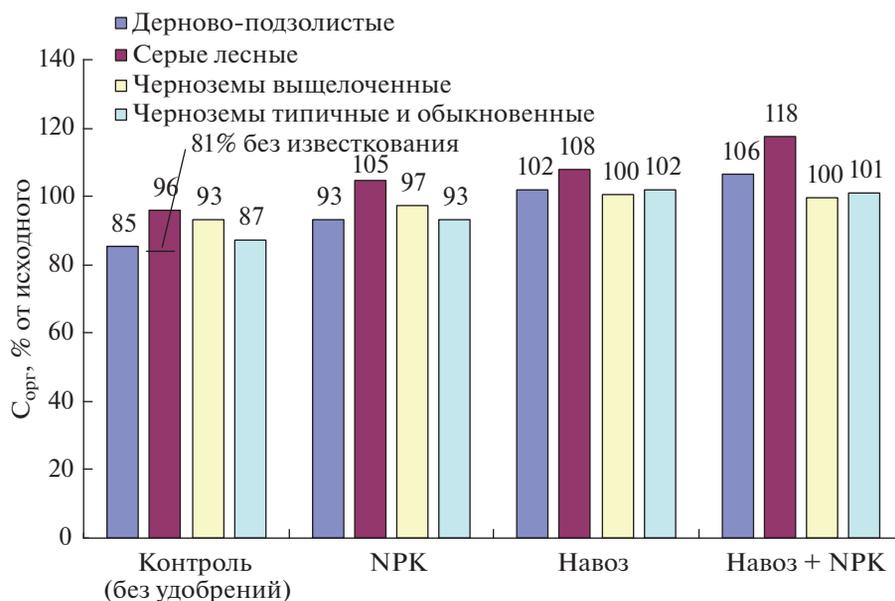


Рис. 4. Изменение относительного содержания  $C_{орг}$  на дерново-подзолистых, серых лесных почвах и черноземах (выщелоченных, типичных и обыкновенных) по сравнению с исходным уровнем (до закладки опытов, обобщенные данные).

Таблица 3. Изменение  $S_{орг}$  в длительных стационарных опытах Геосети России (21 опыт) по сравнению с исходным уровнем

Место проведения опыта, учреждение Геосети	Год закладки	Изменение содержания $S_{орг}$ , абс. % от исходного				Изменение запасов $S_{орг}$ в пахотном слое (0–20 см) от исходного уровня, т/га			
		контроль (без удобрений)	NPК	навоз	навоз + NPК	контроль (без удобрений)	NPК	навоз	навоз + NPК
Дерново-подзолистые почвы (Retisols, Luvisols and Podzols)									
Владимирская область	1968	-0.07	-0.04	0.06	0.11	-1.89	-1.08	1.62*	2.97*
Брянская область	1993	-0.13	-0.13	0.02	0.03	-3.51*	-3.51*	0.54	0.81
Тверская область	1948	-0.55	-0.36	-0.38	-0.33	-14.85*	-9.72*	-10.26*	-8.91*
Смоленская область	1978	-0.40	-0.30	-0.20	-0.10	-10.80*	-8.10*	-5.40*	-2.70*
Удмуртская республика	1979	-0.39	-0.35	-0.34	-0.26	-10.53*	-9.45*	-9.18*	-7.02*
Московская область, ВНИИК	1947	0.38	0.50	0.76	—	10.26*	13.50*	20.52*	—
Москва, ДАОС	1931	-0.36	-0.10	0.08	—	-9.72*	-2.70*	2.16*	—
Пермский край	1968	-0.04	0.02	0.02	0.16	-1.08*	0.54	0.54	4.32*
Московская область, ВНИИА	1960	0.05	0.09	—	0.17	1.35	2.43*	—	4.59*
Московская область, СШ-5	1964	-0.30	-0.40	0.00	0.00	-8.10	-10.80*	0.00	0.00
Серые лесные почвы (Luvic Greyzemis Phaeozem)									
Владимирская область	1993	-0.07	0.08	0.14	0.31	-1.89*	2.16*	3.78*	8.37*
Черноземы выщелоченные, обыкновенные, типичные (Chernozems)									
Курганская область	1970	0.00	-0.09	-0.05	0.00	0.00	-1.80	-1.00	0.00
Омск	1987	-0.02	0.10	0.09	0.21	-0.40	2.00	1.80	4.20*
Нальчик	1948	-0.45	-0.24	—	0.08	-9.00*	-4.80*	—	1.60*
на богаре при орошении	1936	-0.48	-0.30	—	-0.16	-9.60*	-6.00*	—	-3.20*
Воронежская область	1978	-0.7	0.29	—	0.23	-14.00*	5.80*	—	4.60*
Краснодарский край	1978	-0.03	0.08	—	0.09	-0.60	1.60	—	1.80*
Белгородская область	1987	-0.14	-0.13	0.07	0.08	-2.80*	-2.60*	1.40*	1.60*
Каштановые почвы (Kastanozems)									
Бурятия, Улан-Удэ	1967	-0.26	-0.15	0.06	-0.06	-7.02*	-4.05*	1.62*	-1.62*
Лугово-бурые почвы (Albic Stagnic Luvisol)									
Хабаровский край	1965	-0.46	-0.17	-0.23	-0.29	-12.42*	-4.59*	-6.21*	-7.83*
без известкования с известкованием	1941	-0.52	-0.23	0.12	-0.06	-14.04*	-6.21*	0.12	-1.62*
Приморский край	1941	-0.48	-0.32	—	-0.21	-12.96*	-8.64*	—	-5.67*
Лугово-черноземовидные почвы (Luvic Greyzemis Stagnic Phaeozem)									
Амурская область	1964	-0.70	-0.81	—	-0.58	-18.90*	-21.87*	—	-15.66*

\* Достоверные изменения содержания и запасов  $S_{орг}$  при  $p < 0.05$  указаны по данным работ авторов, приведенных в табл. 1.

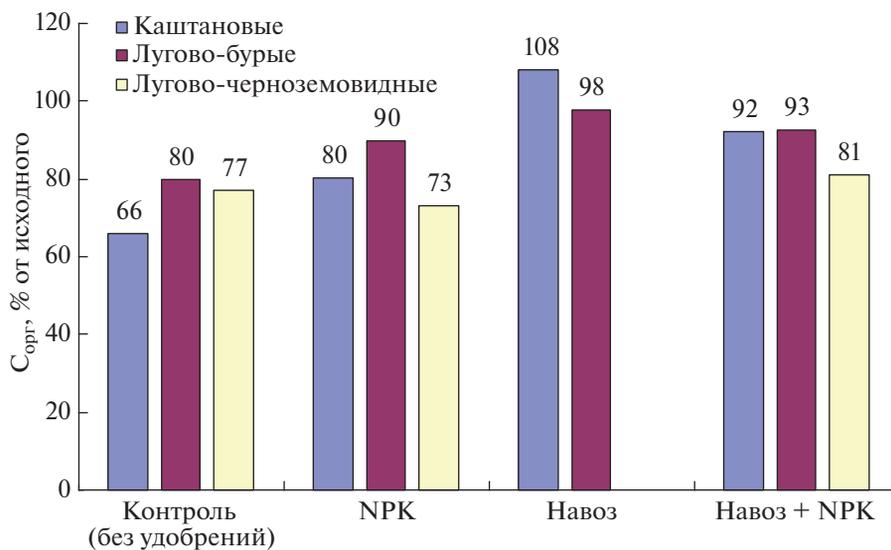


Рис. 5. Изменение относительного содержания  $C_{орг}$  в каштановых почвах, лугово-бурых и лугово-черноземовидных по сравнению с исходным уровнем (до закладки опытов, обобщенные данные).

ванием подзолистого горизонта, что в свою очередь вызвало резкое подкисление и снижение содержания  $C_{орг}$ . В 5–8 ротациях темпы уменьшения запасов гумуса значительно замедлились в вариантах с внесением удобрений, в то время как на контроле продолжалась значительная убыль  $C_{орг}$ .

Подобные тенденции отмечаются на дерново-подзолистых легко- и среднесуглинистых почвах в опытах Ижевской ГСХА Удмуртской Республики и Смоленского НИИСХ Смоленской области [6, 19]. Наибольшее уменьшение содержания почвенного органического углерода в этих опытах отмечается в контрольных вариантах ( $-0.39$ – $0.40\%$   $C_{орг}$ ), наименьшее – при органо-минеральной системе удобрения ( $-0.10$ – $0.26\%$   $C_{орг}$ ). Следует отметить, что запасы органического вещества в пахотном слое почвы (0–20 см) без внесения удобрений существенно снизились на 10.5–10.8 т/га, при органо-минеральной системе – 2.7–7.0 т/га (табл. 3)

В опыте Бурятского НИИСХ, заложенном на каштановой почве в 1967 г., темпы снижения  $C_{орг}$  (табл. 3) в варианте без удобрений сохранялись высокими как в первые десятилетия после закладки эксперимента, так и в начале 2000-х годов ( $\Delta C = -0.005\%/год$ ). Во многом это связано с засушливыми условиями, ветровой эрозией, глубоким промерзанием зимой почвенного профиля, а также ведением севооборота с чистым паром. Только внесение навоза из расчета 5 т/га севооборотной площади обеспечило за 50 лет достоверный прирост запасов почвенного углерода на 1.6 т/га [5].

Орошение чернозема обыкновенного карбонатного в опыте Кабардино-Балкарском научном центре РАН (г. Нальчик) увеличивает убыль содержания гумуса по сравнению с возделыванием культур на богаре, уменьшая его величины по срав-

нению с исходным уровнем на 0.06–0.23% [16]. Вероятно, при оптимизации уровня влажности почвы в условиях повышенных температур усиливается минерализация почвенного органического вещества.

Следует отметить значительные потери  $C_{орг}$  ( $-0.21$ – $0.58\%$ ) на лугово-бурых почвах без известкования, а также на лугово-черноземовидных почвах юга Дальнего Востока в вариантах с внесением навоза и NPK [27]. Изначально высокий уровень содержания  $C_{орг}$ , большая насыщенность севооборотов соей и пшеницей в условиях повышенного, иногда избыточного увлажнения при сравнительно высоких температурах в летний период являются причинами дегумификации почв, которая продолжается даже при органо-минеральных системах удобрения.

По данным [41], при исходном высоком содержании  $C_{орг}$  в почве оно может уменьшаться, пока не будет достигнут новый уровень, даже если дозы органических удобрений рассчитаны в соответствии с бездефицитным балансом гумуса. Таким образом, исходное содержание  $C_{орг}$  и последующие механические обработки, орошение, особенности климата и другие факторы могут иметь решающее влияние на направленность и скорость изменения содержания гумуса в почве.

Обратная тенденция – увеличение содержания  $C_{орг}$  отмечена в опыте ВНИИ кормов, заложенном на дерново-подзолистой среднесуглинистой почве [14]. Здесь в 1947 г. на суходоле временного избыточного увлажнения была высеяна травосмесь для создания пастбищной агроэкосистемы на основе клевера лугового (*Trifolium pratense* L.), клевера ползучего (*Trifolium repens* L.), тимофеевки луговой (*Phleum pratense* L.), овсяни-

**Таблица 4.** Изменение содержания и запасов  $C_{орг}$  в пахотном слое почв (0–20 см) в 15 длительных опытах России при внесении органических удобрений по сравнению с контролем (без удобрений)

Тип почвы	Место проведения опытов	Различие в содержании (запасов) углерода между вариантом с органическими удобрениями и контролем		Увеличение запасов $C_{орг}$ , % от контроля
		абс. %	т/га	
Дерново-подзолистые	Владимирская область	0.13	3.5	23*
	Брянская область	0.27	7.3	28*
	Тверская область	0.15	4.1	26*
	Смоленская область	0.00	0.0	0
	Удмуртская республика	0.05	1.4	6
	Москва, ДАОС	0.44	11.9	63*
	Пермский край	0.06	1.6	5
	Московская область, СШ-5	0.12	3.2	16*
Серые лесные	Владимирская область	0.21	5.7	13*
	Курганская область	–0.04	–0.8	–1
Черноземы выщелоченные, обыкновенные, типичные	Омск	0.11	2.2	3
	Белгородская область	0.21	4.2	7*
Каштановые	Улан-Удэ	0.32	8.6	64*
Лугово-бурые	Хабаровский край			
	без известкования	0.41	11.1	21*
	с известкованием	0.46	12.4	22*
Среднее		0.19	5.0	20

\* Указано достоверное увеличение (уменьшение) запасов  $C_{орг}$ , % от контроля (без удобрений), при  $p < 0.05$  (на основании расчетов, проведенными авторами).

цы луговой (*Festuca pratensis* Huds), лисохвоста лугового (*Alopecurus pratensis* L.), костреца безостого (*Bromus inermis* Leyss.) и мятлика лугового (*Poa pratensis* L.). Спустя 66 лет, во всех вариантах опыта отмечено увеличение содержания почвенного органического вещества: на 0.38% в контроле и на 0.50–0.76% при внесении НРК и навоза. По данным авторов, использование ФАР (фотосинтетически активная радиация) фитомассой пастбищных трав на контроле составляла 0.25%, при раздельном внесении  $N_{120(40-40-40)}P_{45}K_{90}$  (в виде трех подкормок за вегетацию) и навоза (20 т/га) – 0.78 и 0.43% соответственно, а при совместном внесении использование ФАР составляло 0.71%.

Большое накопление поукосно-корневых остатков, отсутствие механической обработки почвы в условиях оптимального увлажнения явилось одной из причин увеличения содержания  $C_{орг}$  в луговой агроэкосистеме даже без внесения удобрений. Среднегодовой прирост  $C_{орг}$  в данных условиях составлял 0.0057% на контроле и 0.0076 и 0.0115% при внесении минеральных и органических удобрений соответственно (табл. 3).

Во всех остальных опытах наблюдалось заметное уменьшение содержания  $C_{орг}$  в контроле, за исключением Курганского НИИСХ [8]. Применение НРК приводило к увеличению  $C_{орг}$  по сравнению с исходным уровнем в 8 опытах, а навоза и его совместного использования с НРК – в 12 опытах из 23 (табл. 4).

В дерново-подзолистых почвах длительных полевых опытов Геосети убыль углерода в контрольном варианте идет наиболее быстро – в среднем теряется около 15%  $C_{орг}$  от исходного уровня. Применение минеральных удобрений уменьшает темпы сокращения содержания почвенного органического углерода, но полностью остановить его не могут. Только органические и органо-минеральные системы удобрения обеспечивают устойчивое равновесие между минерализацией и поступлением углерода в почву (рис. 4).

Проведение известкования на серых лесных почвах (в опыте Владимирского НИИСХ) стабилизирует содержание  $C_{орг}$  практически на исходном уровне (96%), а применение минеральных и органических удобрений способствует увеличению содержания углерода в почве на фоне известкования на 5–8%, при совместном внесении навоза и НРК – на 18% [23]. Изменение первоначального уровня  $C_{орг}$  в черноземах выщелоченных, обыкновенных, типичных под действием удобрений имеет общие тенденции. В целом они обладают большей устойчивостью к дегумификации при длительной 27–67-летней эксплуатации почв без применения удобрений. Так, средняя убыль  $C_{орг}$  за это время, по обобщенным данным, составляет для контрольного варианта 7–13% от первоначального уровня. Внесение минеральных удобрений хоть и уменьшает среднегодовые потери углерода, но полностью их не компенсирует. Толь-

ко применение навоза и его сочетание с NPK способствует стабилизации содержания почвенного органического вещества в черноземах на исходном уровне [4, 8, 9, 16, 21, 22, 27, 32].

В условиях засушливого климата каштановые почвы являются наименее устойчивыми к деградации, теряя в варианте без удобрений 1/3 от первоначального содержания углерода. Только применение органических удобрений способствует сохранению  $C_{орг}$  [33].

В длительных опытах, заложенных на юге Дальнего Востока, отмечается заметное уменьшение содержания углерода с момента закладки опытов (рис. 4). Этому способствует муссонный климат с теплым и в некоторые периоды лета избыточным увлажнением, с холодной малоснежной весной, в результате происходит глубокое промерзание почвенного профиля. При этом органические и органо-минеральные системы удобрений несколько снижают скорость деградации. В опытах ВНИИ сои в Амурской области на лугово-черноземовидных почвах количество гумуса уменьшалось быстрее, чем на лугово-бурых почвах Приморского и Хабаровского краев, причем максимальное уменьшение (на 27%) отмечено в варианте с применением минеральных удобрений [27].

Следует отметить, что лугово-черноземовидные и лугово-бурые почвы наряду с каштановыми являются наименее устойчивыми к деградации и нуждаются в обязательном применении удобрений, в первую очередь органических.

Для оценки экологического значения органических удобрений, необходимо учитывать количество углерода, накапливаемого в почве, а также эффективность накопления  $C_{орг}$ . После того, как в почве достигнуто устойчивое равновесие, количество  $C_{орг}$ , ежегодно вносимого с органическими удобрениями, поддерживает устойчивый уровень органического вещества и соответствует количеству минерализованного углерода в год [41]. Нами проведена оценка запасов почвенного органического углерода в неудобренной почве и при внесении навоза в дозе  $\approx 10$  т/га в год и оценен вклад органических удобрений в накопление  $C_{орг}$  по сравнению с контролем (табл. 4). Как показывают данные, различие в запасах углерода в пахотном слое почвы (0–20 см) между вариантами без удобрений и навоз в среднем для дерново-подзолистых почв составляло 21% (с колебаниями от 0 до 63%), серых лесных – 13%, черноземов – 3% (от –1 до 7%), лугово-бурых почв – 21.5% (21–22%). Наибольшее накопление углерода отмечается при внесении навоза в условиях засушливой степи на каштановой почве – 63%. В целом по всем опытам увеличение запасов углерода при внесении навоза в дозе  $\approx 10$  т/га по сравнению с неудобренной почвой составляют 20%. Полученные дан-

ные полностью согласуются с данными длительных полевых опытов в Европе [35, 41–43]. В то же время необходимо отметить, что разные типы почв существенно отличаются по исходному содержанию углерода, поэтому одинаковый прирост, выраженный в процентах, может давать большие различия при пересчете в тонны на гектар. По разнице в накоплении  $C_{орг}$  (в т/га, в слое 0–20 см) при внесении органических удобрений по сравнению с контролем почвы можно расположить в следующий убывающий ряд: лугово-бурые (11.8 т/га) > каштановые (8.6) > серые лесные (5.7) > дерново-подзолистые (4.1) > черноземы (1.9 т/га). Такое увеличение запасов  $C_{орг}$  при внесении навоза способствует поддержанию содержания углерода на уровне, близком к исходному, практически во всех анализируемых длительных опытах Геосети. Следует отметить исключительно важное влияние органических удобрений на стабилизацию содержания органического вещества в экстремальных климатических условиях сухостепной зоны на каштановой почве и при муссонном климате на лугово-бурых почвах. Наименьшее различие в накоплении углерода отмечается при внесении навоза на черноземах, что, видимо, объясняется исходно высокими запасами гумуса (до 600–700 т/га), большой устойчивостью почвенного органического вещества, а также несколько меньшими дозами внесения навоза. Кроме того, в черноземной зоне преобладают зернопаропашные севообороты с сахарной свеклой и кукурузой, что наряду с наличием в них чистого пара способствует усилению минерализации органического вещества навоза по сравнению с опытами, проведенными в других почвенно-климатических условиях.

Согласно обобщениям 21-го длительного стационарного опыта Геосети ВНИИА, за минимальное содержание углерода в почве можно принять его количество в вариантах без удобрений (контроль). Именно в них отмечается наименьшее содержание  $C_{орг}$ , и как следствие минимальная урожайность культур севооборотов. За оптимальное содержание углерода в почве ( $C_{опт}$ ) можно принять варианты с наибольшим содержанием  $C_{орг}$  (табл. 2). При этом убыль почвенного органического углерода по сравнению с исходным уровнем должна быть минимальной, с поддержанием устойчивого (квазиравновесного) содержания углерода в почвах [26, 30]. Этим условиям соответствуют в большинстве опытов Геосети варианты с органо-минеральной системой удобрения, где наряду со стабилизацией содержания почвенного органического углерода отмечается наибольшая продуктивность севооборотов. Уровни минимального и оптимального содержания  $C_{орг}$  в почвах можно принять как эталонные для каждого типа почв с учетом применяемой системы удобрения.

Следует отметить, что полученные в длительных опытах величины  $C_{\text{опт}}$  несколько меньше существующих градаций по степени гумусированности [20]. В большинстве опытов почвы можно отнести к слабо- и среднегумусированным. Наиболее объективные данные приведены в работах [11, 26], в которых классы учитывают не только тип почвы и гранулометрический состав, но и увязаны с природно-климатическими особенностями регионов Российской Федерации. В то же время значения классов по степени гумусированности не всегда отвечают реальным данным, многие оценки  $C_{\text{min}}$ , приведенные в статье [11], являются экспертными. Именно поэтому, на наш взгляд, наиболее объективно оценить изменение степени гумусированности почв возможно только при мониторинге в длительных стационарных полевых опытах на основных типах почв различного гранулометрического состава. При этом следует отметить, что уточнение минимально допустимого, критического, содержания гумуса в почвах возможно в большинстве многолетних стационарных полевых опытах Геосети путем закладки вариантов с бесменным чистым паром. Например, как предлагается в работе [11] на старопашотной почве, находящейся вблизи стационарного опыта, что позволит быстро, через 10–15 лет парования, установить близкий к реальному уровень  $C_{\text{min}}$ .

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе анализа 21-го длительного стационарного эксперимента, проводимого в рамках Географической сети полевых опытов с удобрениями в России, выявлены следующие географические закономерности эффективности удобрений. В европейской части России продуктивность севооборотов увеличивается с севера на юг в ряду почв: дерново-подзолистые < серые лесные < черноземы (выщелоченные, обыкновенные, южные), при этом наибольшая продуктивность севооборотов обеспечивает органо-минеральная система удобрений. В сухостепных условиях Забайкалья урожайность резко уменьшается, ее наибольшая величина достигается при раздельном внесении органических и минеральных удобрений. На юге Дальнего Востока более продуктивными являются лугово-бурые почвы по сравнению с лугово-черноземовидными. В условиях муссонного климата эффективность органо-минеральных систем удобрения равна минеральной.

В длительных полевых экспериментах отмечались большие различия в содержании  $C_{\text{орг}}$  между опытами даже в пределах одного типа почв, которое колебалось в диапазоне 0.5–4.16%. В 18 опытах наибольшая разница между минимальным и максимальным содержанием  $C_{\text{орг}}$  наблюдалась между контролем и органо-минеральной системой удоб-

рения, в трех опытах – между контролем и органической системой. Достоверные различия в содержании почвенного органического углерода между вариантами без удобрения и навоз + NPK в четырех опытах были <10 отн. %, в шести – 11–20% и в десяти – >20%.

На дерново-подзолистых, серых лесных и черноземных почвах наибольшая убыль органического вещества отмечалась в контрольном варианте. Минеральные удобрения уменьшали потерю  $C_{\text{орг}}$  почвами, но полностью их не компенсировали, за исключением серых лесных почв. Органическая и органо-минеральная системы способствовали стабилизации содержания углерода в почвах. При этом лугово-черноземовидные и лугово-бурые почвы наряду с каштановыми являются наименее устойчивыми к дегумификации и нуждаются в обязательном применении удобрений, в первую очередь органических.

Выявлены уровни минимального (в варианте без удобрений) и оптимального (при совместном внесении органических и минеральных удобрений) содержания  $C_{\text{орг}}$  в изучаемых опытах Геосети ВНИИА, которые можно принять как эталонные для каждого типа почв и разновидности по гранулометрическому составу с учетом применяемой системы удобрения.

### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алиев А.М., Самойлов Л.Н., Цимбалист Н.И. Эффективность комплексного применения средств химизации в Нечерноземной зоне (итоги 55 лет исследований в длительном полевом опыте) // *Агротехника*. 2016. № 2. С. 20–30.
2. Белоус Н.М., Сычев В.Г., Шаповалов В.Ф., Белоус И.Н. Влияние длительного применения средств химизации на продуктивность плодосменного севооборота и плодородие дерново-подзолистой почвы в условиях радиоактивного загрязнения // *Плодородие*. 2013. № 3. С. 1–3.
3. Бижоев В.М. Обоснование оптимальной системы удобрения в зернопропашном севообороте на черноземе обыкновенном при орошении в степной зоне Центрального Предкавказья. Автореф. дис. ... докт. с.-х. наук. Владикавказ, 2006. 50 с.
4. Бижоева Т.П., Бижоев Р.В. Использование результатов длительных полевых опытов с удобрениями для разработки стратегии получения урожая сельскохозяйственных культур и сохранения и воспроизводства плодородия чернозема обыкновенного карбонатного степной зоны Центрального Предкавказья // *Устойчивое развитие: проблемы, концепции, модели*. Мат.-лы Всерос. конф., 2017. С. 280–284.
5. Билтуев А., Будажапов Л.В., Лапухин Т.П. Динамика изменения гумуса в каштановых почвах Запад-

- ного Забайкалья при длительном применении удобрений // Плодородие. 2017. № 3. С. 8–10.
6. *Бортник Т.Ю.* Агрохимические основы воспроизводства плодородия дерново-подзолистых почв и повышения продуктивности агроценозов в Вятско-Камской земледельческой провинции. Автореф. дис. ... д. с.-х. н. М., 2019. 46 с.
  7. *Будажанов Л.В., Билтуев А.С., Уланов А.К.* Влияние различных систем удобрений на продуктивность культур зернопарового севооборота при систематической засухе в условиях сухой степи Бурятии // Итоги выполнения программы фундаментальных научных исследований государственных академий на 2013–2020 гг. 2018. С. 31–39.
  8. *Волынкин В.И., Волынкина О.В., Копылов А.Н.* Изменение почвенного плодородия при длительном применении удобрений в Курганской области // Агрохимия. 2019. № 8. С. 3–13.
  9. *Воронкова Н.А., Балабанова Н.Ф.* Влияние длительного применения удобрений в зернотравяном севообороте на агрохимические свойства чернозема выщелоченного и урожайность сельскохозяйственных культур // Достижения науки и техники АПК. 2013. № 5. С. 30–32.
  10. *Ковшик И.Г., Науменко Е.Т., Науменко А.В.* Длительное удобрение лугового-черноземовидной почвы и урожайность сои // Земледелие. 2011. № 1. С. 19.
  11. *Козут Б.М.* Оценка содержания гумуса в пахотных почвах России // Почвоведение. 2012. № 9. С. 944–952.
  12. *Косолапова А.И., Рафхатовна Я.В., Тагирьянова В.М.* Влияние систем удобрения на продуктивность севооборотов, агрохимические показатели дерново-подзолистых почв Пермского края и накопления в них тяжелых металлов (по материалам длительных опытов) // 75 лет Географической сети опытов с удобрениями. Мат-лы Всерос. совещ. М.: ВНИИА, 2016. С. 121–127.
  13. *Кузьменко Н.Н.* Баланс элементов питания в почве и продуктивность льняного севооборота при разной насыщенности удобрениями // Агрохимия. 2016. № 11. С. 25–30.
  14. *Кулаков В.А., Алтунин Д.А.* Эффективность длительного (69 лет) применения минеральных и органических удобрений на суходольных пастбищах Нечерноземной зоны // 75 лет Географической сети опытов с удобрениями. Мат-лы Всерос. сов. М.: ВНИИА, 2016. С. 148–153.
  15. *Литвинский В.А., Муравин Э.А., Черников В.А., Грицевич Ю.Г., Игнатов В.Г., Хлыстовский А.Д.* Продуктивность севооборота с клеверным паром и агрохимические свойства дерново-подзолистой почвы в длительном (с 1931 г.) опыте Д.Н. Прянишникова № 2 на ДАОС // Агрохимия. 2010. № 8. С. 15–30.
  16. *Лифаненкова Т.П., Бижоев Р.В.* Влияние систематического применения удобрений в условиях богары и при длительном орошении на урожайность культур, продуктивность зернотравянопропашного севооборота и плодородие чернозема обыкновенного карбонатного в агроландшафтном земледелии Центрального Предкавказья // Агрохимия. 2018. № 4. С. 3–17.
  17. *Лукин С.М.* Агрэкологическое обоснование систем применения удобрений в севооборотах на дерново-подзолистых супесчаных и песчаных почвах. Автореф. дис. ... д. б. н. М., 2009. 46 с.
  18. *Мерзлая Г.Е.* Биологические факторы в системах удобрения // Агрохимия. 2017. № 10. С. 24–36.
  19. *Мерзлая Г.Е., Зябкина Г.А., Фомкина Т.П., Козлова А.В., Макшакова О.В., Волошин С.П., Хромова О.М., Панкратенкова И.В.* Эффективность длительного применения органических и минеральных удобрений на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве // Агрохимия. 2012. № 2. С. 37–46.
  20. Методические указания по проведению комплексного мониторинга плодородия почв земель сельскохозяйственного назначения / Под ред. Державина Л.М., Булгакова Д.С. М., 2003. С. 184–187.
  21. *Минакова О.А., Александрова Л.В., Подвигина Т.Н.* Влияние последствий удобрений на урожайность культур в зернопаропропашном севообороте лесостепи ЦЧР // Агрохимия. 2019. № 8. С. 18–23.
  22. *Минакова О.А., Тамбовцева Л.В., Громовик А.И.* Влияние длительного применения минеральных удобрений и навоза на гумусное и азотное состояние чернозема выщелоченного в зерносвекловичном севообороте лесостепи ЦЧЗ // Агрохимия. 2011. № 5. С. 18–25.
  23. *Окорков В.В., Фенова О.А., Окоркова Л.А.* Приемы комплексного использования средств химизации в севообороте на серых лесных почвах Верхневолжья в агротехнологиях различной интенсивности. Суздаль, 2017. 176 с.
  24. Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. М.: Росгидромет, 2008. С. 9.
  25. *Рябец В.К., Федорова Т.Н., Асеева Т.А.* Динамика агрохимических показателей плодородия почв в Хабаровском крае и оценка влияния систем удобрений на качественное состояние земель // Динамика показателей плодородия почв и комплекс мер по их регулированию при длительном применении систем удобрения в разных почвенно-климатических зонах. Мат-лы Междунар. научн. конф. М.: ВНИИА, 2018. С. 78–87.
  26. *Семенов В.М., Козут Б.М.* Почвенное органическое вещество. М.: ГЕОС, 2015. 233 с.
  27. *Синеговская В.Т., Науменко Е.Т.* Плодородие почвы и продуктивность зерно-соевого агроценоза при длительном внесении удобрений // 75 лет Географической сети опытов с удобрениями. Мат-лы Всерос. совещ. М.: ВНИИА, 2016. С. 237–242.
  28. *Сычев В.Г., Листова М.П., Рухович О.В., Романенков В.А.* Научные основы, состояние и рекомендации применения удобрений в Северо-Кавказском регионе // Бюл. Геосети опытов с удобрениями. М.: ВНИИА, 2007. Вып. 4. С. 11–17.
  29. *Сычев В.Г., Романенков В.А., Беличенко М.В.* Значение Географической сети опытов с удобрениями для решения современных проблем сельскохозяйственного производства // 75 лет Географической сети опытов с удобрениями. Мат-лы Всерос. совещ. М.: ВНИИА, 2016. С. 3–10.
  30. *Сычев В.Г., Шевцова Л.К., Мерзлая Г.Е.* Исследование динамики и баланса гумуса при длительном применении систем удобрения на основных типах почв // Агрохимия. 2018. № 2. С. 3–21.
  31. *Тимошинов Р.В., Кушаева Е.Ж.* Изменение продуктивности сельскохозяйственных культур и плодородия почвы при длительном применении различных систем удобрений в полевом севообороте в

- условиях Приморского края // Итоги выполнения программы фундаментальных научных исследований государственных академий на 2013–2020 гг. М., 2018. С. 299–307.
32. Тютюнов С.И., Солнцев П.И., Шаповалов Н.К., Хорошилова Ю.В., Горохова Ж.Ю., Каторгин Д.И., Емец М.В. Результаты изучения технологий применения средств химизации в зернопропашном севообороте // Итоги выполнения программы фундаментальных научных исследований государственных академий на 2013–2020 гг. М., 2018. С. 307–319.
  33. Уланов А.К., Будажапов Л.В. Продуктивность каштановой почвы в зависимости от условий увлажнения при многолетнем воздействии севооборотов, приемов основной обработки и удобрений в сухой степи // Земледеле. 2019. № 1. С. 15–18.
  34. Шевцова Л.К. Современные направления в исследовании органического вещества почв в длительных опытах // Проблемы агрохимии и экологии. 2009. № 3. С. 39–47.
  35. Blanchet G., Gavazov K., Bragazza L., Sinaj S. Responses of soil properties and crop yields to different inorganic and organic amendments in a Swiss conventional farming system // Agric. Ecosyst. Environ. 2016. V. 230. P. 116 <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.05.032>
  36. Birkhofer K., Bezemer T.M., Bloem J., Bonkowski M., Christensen S., Dubois D., Ekelund F. et al. Long-term organic farming fosters below and aboveground biota: implications for soil quality, biological control and productivity // Soil Biol. Biochem. 2008. V. 40. P. 2297–2308. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2008.05.007>
  37. Edmeades D.C. The long-term effects of manures and fertilizers on soil productivity and quality: a review // Nutr. Cycling Agroecosystems. 2003. V. 66. № 2. P. 165–180.
  38. Janzen H.H. Long-term ecological sites: musings on the future, as seen (dimly) from the past // Global Change Biology. 2009. V. 15. P. 2770–2778.
  39. Kätterer T., Börjesson G., Kirchmann H. Changes in organic carbon in topsoil and subsoil and microbial community composition caused by repeated additions of organic amendments and N fertilisation in a long-term field experiment in Sweden // Agric. Ecosyst. Environ. 2014. V. 189. P. 110–118. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.03.025>
  40. Korschens M. Soil organic carbon (Corg) – importance, determination, evaluation // Arch Agron Soil Sci. 2010. V. 56. P. 375–392 (in German).
  41. Korschens M. et al. Effect of mineral and organic fertilization on crop yield, nitrogen uptake, carbon and nitrogen balances, as well as soil organic carbon content and dynamics: results from 20 European long-term field experiments of the twenty-first century // Archives of Agronomy and Soil Science. 2013. V. 59. P. 1017–1040. <https://doi.org/10.1080/03650340.2012.704548>
  42. Lützw M.V., Kögel-Knabner I., Ekschmitt K., Matzner E., Guggenberger G., Marschner B., Flessa H. Stabilization of organic matter in temperate soils: mechanisms and their relevance under different soil conditions a review // Eur. J. Soil Sci. 2006. V. 57. P. 426–445. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2006.00809>
  43. Maltas A., Charles R., Jeangros B., Sinaj S. Effect of organic fertilizers and reduced-tillage on soil properties, crop nitrogen response and crop yield: results of a 12-year experiment in Changins, Switzerland // Soil Tillage Res. 2013. V. 126. P. 11–18. <https://doi.org/10.1016/j.still.2012.07.012>

## Influence of Fertilizer Systems on the Soil Organic Carbon Content and Crop Yields: Results of Long-Term Field Experiments at the Geographical Network of Research Stations in Russia

V. G. Sychev<sup>1</sup>, A. N. Naliukhin<sup>1,\*</sup>, L. K. Shevtsova<sup>1</sup>, O. V. Rukhovich<sup>1</sup>, and M. V. Belichenko<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Pryanishnikov All-Russia Research Institute of Agrochemistry, Moscow, 127434 Russia*

*\*e-mail: naliukhin@yandex.ru*

In this paper, the results of long-term experiments (LTEs) performed at the geographical network of experimental stations encompassing the major types of agricultural soils in Russia (soddy-podzolic (Retisols, Luvisols, and Podzols); gray forest (Luvic Greyzemic Phaeozems); leached, typical, and southern chernozems (Chernozems); chestnut soils (Kastanozems); meadow brown soils (Albic Stagnic Luvisols); and meadow chernozem-like soils (Luvic Greyzemic Stagnic Phaeozems)) within the entire country (from the north to the south of the European part of Russia, Siberia, and south of the Far East region (Amur oblast, Khabarovsk, and Primorsk regions)) are summarized. Most of the stationary LTEs have a duration of 20–45 years; ten LTEs have a duration from 50 to 81 years. It was found that the organomineral fertilizer system (OMFS) exceeds the mineral fertilizer system (MFS) in its effect on the yield by 1–40% in 18 experiments, while the MFS is more efficient than the OMFS by 2–3% in only three LTEs. Within the same soil type, differences in the Corg content between unfertilized trials reach 0.56–1.55% for soddy-podzolic soils and 1.58–3.93% for chernozems. Differences in the soil Corg content between the unfertilized and OMFS (manure + NPK) trials are less than 10% in four LTEs, 11–20% in six LTEs, and > 20% in ten LTEs; the average difference reaches 0.27% of Corg. The levels of minimum (C<sub>min</sub>) and optimum (C<sub>opt</sub>) carbon content have been determined with due account for the soil types, soil texture classes, and the applied fertilizer system. They can be used as reference values for the studied soils.

**Keywords:** long-term field experiments (LTEs), Geographic network of experiments with fertilizers, soil organic carbon, productivity, fertilizer systems

## ДЕГРАДАЦИЯ, ВОССТАНОВЛЕНИЕ И ОХРАНА ПОЧВ

УДК 631.42

### АНАЛИЗ ВВОЗИМЫХ ПОЧВОГРУНТОВ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЗАПАСОВ УГЛЕРОДА В ПОЧВЕННЫХ КОНСТРУКЦИЯХ МОСКОВСКОГО МЕГАПОЛИСА

© 2020 г. И. П. Брянская<sup>a, \*</sup>, В. И. Васенев<sup>a</sup>, Р. А. Брыкова<sup>a</sup>, В. Н. Маркелова<sup>b</sup>, Н. В. Ушакова<sup>b</sup>,  
Д. Д. Госсе<sup>c</sup>, Е. В. Гавриленко<sup>d</sup>, Е. В. Благодатская<sup>e</sup>

<sup>a</sup>Департамент ландшафтного проектирования и устойчивых экосистем, Российский университет дружбы народов,  
ул. Миклухо-Маклая, 10/1, Москва, 117198 Россия

<sup>b</sup>Московский экологический регистр, ул. Новый Арбат, 11, Москва, 119019 Россия

<sup>c</sup>МГУ им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы, 1, Москва, 119199 Россия

<sup>d</sup>Мосэкомониторинг, ул. Новый Арбат, 11, стр. 1, Москва, 119019 Россия

<sup>e</sup>Центр Гельмгольца, Теодор-Лайзер штр., 4, Халле, Германия

\*e-mail: inna.bryanskaya@bk.ru

Поступила в редакцию 29.01.2020 г.

После доработки 14.05.2020 г.

Принята к публикации 27.05.2020 г.

Развитие озеленения и благоустройства в современных городах делает все более актуальными изучение свойств и функций почвенных конструкций. Депонирование углерода — одна из основных экологических функций почв, широко изученная для почв естественных и агроэкосистем, но все еще малоизвестная для городских и техногенных почв. Запасы углерода в городских почвах, особенно в почвенных конструкциях, формируются при доминирующем воздействии антропогенного фактора, отличаются высокой и сложно прогнозируемой неоднородностью. Основные факторы, определяющие запасы углерода почвенных конструкций Московского мегаполиса, — свойства и объемы ввозимых почвогрунтов. По данным опросов компаний-поставщиков проанализирован рынок почвогрунтов, поставляемых в Москву для озеленения и благоустройства в 2016 и 2017 гг., источники и объемы поставок почвогрунтов и их компонентов, рецептуры приготовления и свойства. На основании полученных результатов дан прогноз средних запасов органического углерода — 84 т/га в слое 0–10 см. Сопоставление полученных оценок с результатами полевого обследования представительной выборки точек мониторинга состояния почв Москвы ( $n > 190$ ) показало превышение прогнозных оценок в 1.5–2.0 раза. В то же время сравнительно небольшое абсолютное превышение (на 30–40 т/га) и схожая динамика расчетных и исследованных запасов по годам (увеличение на 10–14% в 2017 по сравнению с 2016 г.) подтверждают предположение об определяющей роли ввозимых почвогрунтов в формировании запасов углерода почвенных конструкций Москвы и подчеркивают важность мониторинга и нормирования свойств ввозимых почвогрунтов как основы устойчивого развития городских экосистем.

*Ключевые слова:* городские и техногенные почвы, экологические функции почв, экосистемные сервисы, конструкторские, устойчивое развитие города

DOI: 10.31857/S0032180X20120047

#### ВВЕДЕНИЕ

Городские почвы — ключевой компонент городских экосистем, экологическая и социально-экономическая роль которого остается недооцененной, что особенно заметно на фоне высокой стоимости городских земель [22, 41]. На протяжении долгого времени большинство исследований городских почв было сфокусировано на вопросах их загрязнения [1, 40], засоления [13, 31], переуплотнения [29], сокращения микробного разнообразия и микробиологической активности [11]. При этом значительная часть результатов была по-

лучена для участков с максимальной антропогенной нагрузкой (промышленных зон, придорожных территорий, строительных площадок), где признаки деградации городских почв по сравнению с фоновыми были наиболее очевидны [4, 23]. Современные концепции устойчивого развития городов не ставят под сомнение существующие проблемы антропогенного воздействия на экологическое состояние почв, но смещают акценты в сторону анализа экологических функций и экосистемных сервисов, которые городские почвы могут реализовывать [2, 46]. Особое внимание

при этом уделяется почвам существующих и создаваемых объектов городской зеленой инфраструктуры [21, 38].

Депонирование углерода – ключевая функция почв, определяющая обеспечение таких экосистемных сервисов, как плодородие, снижение парникового эффекта, иммобилизация поллютантов и сохранение биоразнообразия [12, 55]. Оценки запасов углерода в городских почвах варьируют в широком диапазоне, что связано в высокой пространственной неоднородностью и различными факторами городской среды, воздействующими на депонирование и минерализацию углерода: эффект теплового острова, запечатывание, мероприятия по озеленению и благоустройству [38, 39, 52]. Большинство современных исследований показывает, что запасы углерода в городских почвах могут быть сопоставимы с фоновыми почвами и даже значительно превышать их [3, 44, 48]. В обзоре [50], основанном на анализе результатов, полученных для ста городов мира, предложены следующие механизмы формирования запасов углерода в городских почвах: 1) импорт материала из-за пределов города (в том числе поставки продовольствия, строительных материалов, почвогрунтов и их компонентов); 2) перераспределение запасов внутри города (в том числе накопление и переработка отходов, образование сажки при сжигании топлива) и 3) внутренняя трансформация и консервация (в том числе в результате запечатывания и переувлажнения). Из перечисленных механизмов доминирующее воздействие на формирование запасов углерода в поверхностных горизонтах – наиболее частом объекте экологического мониторинга городских почв – оказывает привнос органического вещества при поставках почвогрунтов и их компонентов для задач озеленения и благоустройства.

Москва – один из наиболее крупных и динамично развивающихся мегаполисов мира. Благоустройство территории, создание новых и реконструкция существующих зеленых зон, рекультивация и другие процессы городского хозяйства определяют высокую потребность города в почвогрунтах. Несмотря на наличие ряда нормативных документов, контролирующих качество почвогрунтов [9, 14, 15], процесс создания почвенных конструкций остается недостаточно регламентированным, а рынок почвогрунтов непрозрачным и сложным для анализа [17, 20]. Объем почвогрунтов и их компонентов, ежегодно ввозимых в Москву для озеленения и благоустройства, превышает 1 млн м<sup>3</sup> [18]. Эти материалы отличаются высоким разнообразием по свойствам и происхождению. Поставки почвогрунтов для частных заказчиков практически никак не регламентируются и не контролируются, что расширяет перечень возможных компонентов. Существующие нормы качества почвогрунтов [115] до-

пускают содержание органического вещества от 4 до 25% (то есть содержание органического углерода от 2 до 15%). В реальности варьирование содержания углерода во ввозимых грунтах может быть еще шире.

Таким образом, верхние насыпные горизонты городских почв в Москве представляют собой “черный слой”. Запасы углерода в них определяются сложной комбинацией факторов, как прогнозируемых (функциональная зона, характер поверхности), так и непрогнозируемых (выбор почвогрунта с определенными свойствами). Даже ориентировочная оценка запасов углерода мало реалистична без понимания структуры баланса ввозимых в Москву почвогрунтов.

Цель работы – изучить объемы и разнообразие свойств почвогрунтов и их компонентов, используемых для озеленения и благоустройства в Московском мегаполисе, и оценить их влияние на формирование запасов углерода в верхнем слое почвенных конструкций в городе.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

**Условия формирования и функционирования почв в Московском мегаполисе.** С населением более 12 млн Москва является самым крупным мегаполисом в Европе. Территория Московского мегаполиса расположена в центре Восточно-Европейской равнины, характеризуется умеренно-континентальным климатом. Фоновая растительность, включающая виды, характерные для южно-таежной зоны, сохранилась преимущественно на территории особо охраняемых природных территорий, а значительную часть зеленых насаждений составляют интродуцированные виды: клен ясенелистный (*Acer negundo* L.), дуб красный (*Quercus rubra* L.), тополь бальзамический (*Populus balsamifera* L.), туя западная (*Thuja occidentalis* L.), декоративные формы деревьев и кустарников [1, 12, 19]. Зональные дерново-подзолистые почвы с различной степенью оподзоленности и оглеения также преимущественно встречаются в рекреационных зонах. Доминируют в городе антропогенно-измененные и антропогенные почвы, значительная часть которых (рекреаземы, реплантоземы, конструктороземы) содержит техногенный рекультивационный горизонт RAT, формируемый за счет подсыпки почвогрунтов [16]. Строительство, озеленение и благоустройство на территории Новой Москвы сопряжено с регулярными поставками органоминеральных смесей, что еще более расширяет рынок почвогрунтов и их компонентов в Московском мегаполисе.

**Правовые и экономические предпосылки формирования рынка почвогрунтов и их компонентов в Московском мегаполисе.** С начала 2000 г. вопросам озеленения и благоустройства Москвы стали

уделять повышенное внимание, что, в свою очередь, способствовало увеличению спроса на растительный материал, удобрения, почвогрунты и их компоненты. Исходно поставки почвогрунтов носили бессистемный, хаотичный характер, происхождение ввозимых грунтов оставалось неизвестным, а контроль качества почв проводился только при приеме объектов озеленения. Регулярное использование для задач озеленения города почв, вывозимых с участков земель сельскохозяйственного назначения или низкокачественных грунтов на основе низинного торфа, привело к пониманию необходимости введения контроля качества и сертификации почвогрунтов. В 2004 г. вышло Постановление правительства Москвы № 514-ПП “О повышении качества почвогрунтов в городе Москве” [15], в дальнейшем прошедшее большое количество редакций и доработок. Принятие в 2007 г. закона города Москва “О городских почвах” [9] закрепило в юридической практике понятие “почвогрунт – обладающая плодородием почвенная масса, созданная искусственно, или плодородный слой, снятый с поверхности земельного участка”. Под это определение попадали смеси разных компонентов, включая гумусовые горизонты, изымаемые при строительстве, рыхлые горные породы, различные виды торфа, сапрпель, растительные остатки. Позже было разрешено использование в качестве добавок отработанных тепличных грунтов и осадков сточных вод после предварительного анализа на содержание водорастворимых солей и поллютантов. Постановлением Правительства Москвы от 8 сентября 2009 г. № 973-ПП было запрещено использование торфа, торфопесчаных смесей и грунтов природного происхождения при производстве работ по рекультивации почв, озеленению и цветочному оформлению в городе Москва и разрешено использование котлованных грунтов в качестве компонента почвогрунта. В настоящее время в перечень компонентов, используемых при производстве почвогрунтов, включены котлованные грунты, торф разной степени разложения, плодородный слой почвы, осадки станций водоподготовки, органические удобрения (биокомпосты) и песок.

В Москве действует не менее 50 крупных поставщиков почвогрунтов. Дать более точную оценку не представляется возможным, так как закупка производится не через отдельные конкурсы, а входит в состав общих смет по озеленению и благоустройству. Расположение площадок по производству почвогрунтов охватывает все направления. При этом исторически основные поставки осуществлялись из Дмитровского района Московской области, а также из тех районов, где есть старые торфопредприятия: Волоколамский район, Рязанская область, Владимирская область.

**Анализ объемов и свойств почвогрунтов и их компонентов.** Для анализа объемов и свойств почвогрунтов, поставляемых для проведения озеленительных работ в Москве, совместно с АНО “Московский экологический регистр” было проведено анкетирование поставщиков. Были опрошены компании, поставлявшие в 2016–2017 гг. не менее 30 тыс. м<sup>3</sup> почвогрунтов в год и имеющие сертификат системы “Экологичные почвогрунты”. Всего в 2016 г. приняли участие 14 компаний, в 2017 – 17 компаний, а 4 компании приняли участие в анкетировании и в 2016, и в 2017 гг. По экспертной оценке АНО “Московский экологический регистр”, опрошенные предприятия обеспечивали до половины всех поставок почвогрунтов для нужд города. В то же время это наиболее прозрачные предприятия, поставки почвогрунтов которых подлежат систематическому анализу и учету. Компании, принявшие участие в анкетировании, ответили на пять вопросов: 1) ежегодный объем поставок; 2) локализация поставок; 3) расположение производственных площадок; 4) рецептура почвогрунта и 5) происхождение компонентов почвогрунта. Полученные данные были дополнены результатами лабораторных исследований свойств поставляемых почвогрунтов по трем показателям: 1) рН<sub>KCl</sub> (потенциометрический метод по ГОСТ 26483-85); 2) гранулометрический состав (по содержанию частиц <0.01 мм по ГОСТ 12536-2014) и 3) содержание органического вещества (бихроматное окисление по Тюрину для почв ГОСТ 26213-91 или по методу определения зольности для торфов ГОСТ-27784-88). Официальные названия компаний в анкетах были заменены порядковыми номерами для обеспечения анонимности.

**Анализ запасов углерода в поверхностных горизонтах почвенных конструкций Московского мегаполиса.** Для сопоставления запасов углерода, прогнозируемых на основе данных по объемам и свойствам почвогрунтов, полученным в результате анкетирования, с полевыми данными были использованы результаты почвенного экологического мониторинга в точках наблюдения ГПБУ “Мосэкомониторинг” в 2016 и 2017 гг. Объекты были равномерно распределены по территории Москвы, включая Новую Москву. Образцы отбирали в различных функциональных зонах: жилых, общественных и рекреационных, зонах транспортной инфраструктуры. Зоны особо охраняемых природных территорий и промышленных предприятий не рассматривали, так как доля почвенных конструкций для них относительно мала. Всего было изучено 192 точки в 2016 г. и 190 точек в 2017 г. (рис. 1, табл. 1). Смешанные пробы отбирали с глубины 0–20 см методом конверта. После сушки на воздухе и пробоподготовки с удалением корней в пробах почв проводили анализ тех же свойств и теми же методами, что и для почвогрунтов: гранулометрического состава, ре-

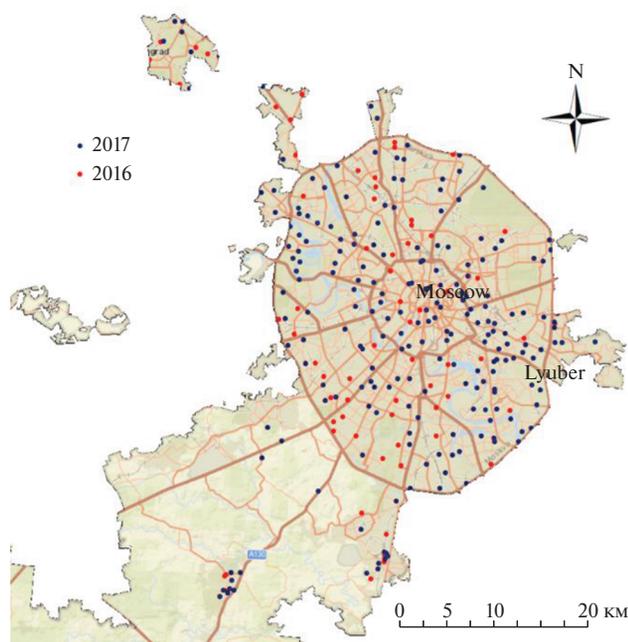


Рис. 1. Распределение точек отбора проб почв в 2016 и 2017 гг.

акции среды ( $pH_{КС}$ ) и содержания органического вещества. Для пересчета содержания органического вещества в содержание органического углерода использовали коэффициент 1.724 [6]. Плотность почв не входит в перечень параметров, наблюдаемых ГПБУ “Мосэкомониторинг”, поэтому для оценки запасов использовали усредненное значение 1.1 г/см, ранее примененное для оценки запасов углерода в поверхностных горизонтах городских почв города Москвы [3, 53]. Запасы (т/га) рассчитывали как произведение содержания органического углерода (%), плотности (г/см<sup>3</sup>) и мощности (см).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

**Структура поставок почвогрунтов и их компонентов.** Результаты анкетирования компаний-поставщиков показали, что в Москву для озелене-

ния и благоустройства было ввезено 960 тыс. м<sup>3</sup> почвогрунтов в 2016 г. и 1750 тыс. м<sup>3</sup> – в 2017 г. Данные 2016 г. соответствуют оценкам ДПиООС (Департамент природопользования и охраны окружающей среды) по ежегодному объему поставок почвогрунтов в Москву на 2012 г. [18], в то время как объем почвогрунтов, ввезенных в 2017 г., превышает эти оценки на 75%. Это косвенно подтверждает предположение о возрастающей потребности города в почвогрунтах, в том числе связанной с реализацией программы “Моя улица” и застройкой Новой Москвы. Всего в рецептурах изученных почвогрунтов использовалось семь основных компонентов, из которых пять составили более 90% от общего объема произведенных почвогрунтов: низинный и верховой торфа, растительный грунт (“срезка”), котлованный грунт, песок. Оставшиеся 10% представлены черноземом, поставлявшимся из Тамбовской области (компания 8, 2016 г.) и осадками сточных вод Мосводоканала (компания 27, 2017 г.). Наиболее распространенная рецептура почвогрунта представляет собой сочетание низинного торфа (от 15 до 40%), растительного или котлованного грунта (от 40 до 70%) и песка (около 10–20%). Наиболее часто используемыми компонентами стали растительный грунт (32 и 51% от всех поставок в 2016 и 2017 г. соответственно) и низинный торф (25 и 30% от всех поставок в 2016 и 2017 г. соответственно). Реже всего применялся верховой торф (рис. 2). В то же время логистика у этих компонентов принципиально отличалась. Растительный грунт, под которым часто подразумевается “срезка” – верхний плодородный слой городской почвы, снятый в процессе строительства, – в основном поставлялся с территорий активной застройки, расположенных на небольшом расстоянии от производственных площадок. Низинный торф, наоборот, поставлялся с больших расстояний – севера, северо-запада и востока Московской области, Тверской, Владимирской и Тульской областей, где исторически развита его добыча (рис. 3). Аналогичный подход к производству почвогрунтов на основании сочетания минеральных компонентов (песок, срезка), добываемых на месте и органических субстратов (торфа,

Таблица 1. Объекты полевого исследования и отбора проб почв в г. Москва в 2016 и 2017 гг.

Функциональная зона	Описание	Объем выборки	
		2016	2017
Жилые функциональные зоны	Зоны жилых микрорайонов и жилых групп многоквартирной жилой застройки, в том числе дворовые территории и детские площадки	92	92
Общественные и рекреационные зоны	Парки, скверы, территории школ, больниц, многофункциональные общественные зоны	82	79
Зоны транспортной инфраструктуры	Зоны линейных объектов внешнего транспорта и магистралей, придорожные территории, гаражи	18	19

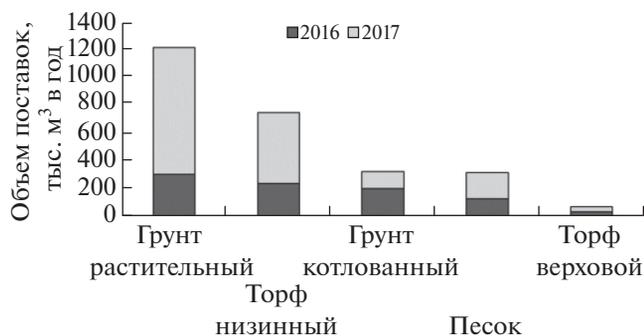


Рис. 2. Объем поставок основных компонентов почвогрунтов.

компосты, донные отложения), поставляемых извне, активно применяется во Франции [35, 54], США [28, 36] и других странах. Что объясняется рентабельностью технологии, позволяющей не только обеспечивать нужды городского озеленения, но и утилизировать нетоксичные строительные отходы.

**Свойства почвогрунтов.** Изученные почвогрунты заметно отличались по содержанию органического углерода, в то время как по кислотности и

гранулометрическому составу выборка была достаточно гомогенной. Среди изученных почвогрунтов доминировали супесчаные и легкосуглинистые, составившие соответственно 45 и 38% от общей выборки. Средний суглинок встречался в 17% случаев, в то время как более тяжелых по гранулометрическому составу грунтов не отмечено совсем. Такой гранулометрический состав соответствует нормативным значениями [15], а также легко объясняется свойствами и генезисом компонентов почвогрунтов, которые в большинстве своем также имеют легкий гранулометрический состав. Для  $pH_{KCl}$  также показано бимодальное распределение с двумя максимумами, соответствующими слабокислой (5.5–6.0) и нейтральной (6.5–7.0) среде. Как правило, более кислая среда отмечена для почвогрунтов с со значительной долей торфа (30–40%), поставляемого преимущественно из Тверской области, Дмитровского и Волоколамского районов. Нейтральная среда характерна для почвогрунтов со значительным количеством антропогенных субстратов (например, максимальное значение  $pH_{KCl}$  было отмечено для грунта, состоявшего на 50% из осадка станции водоподготовки (компания 27, 2017 г.). Однако отмечены и исключения из этой закономерности,

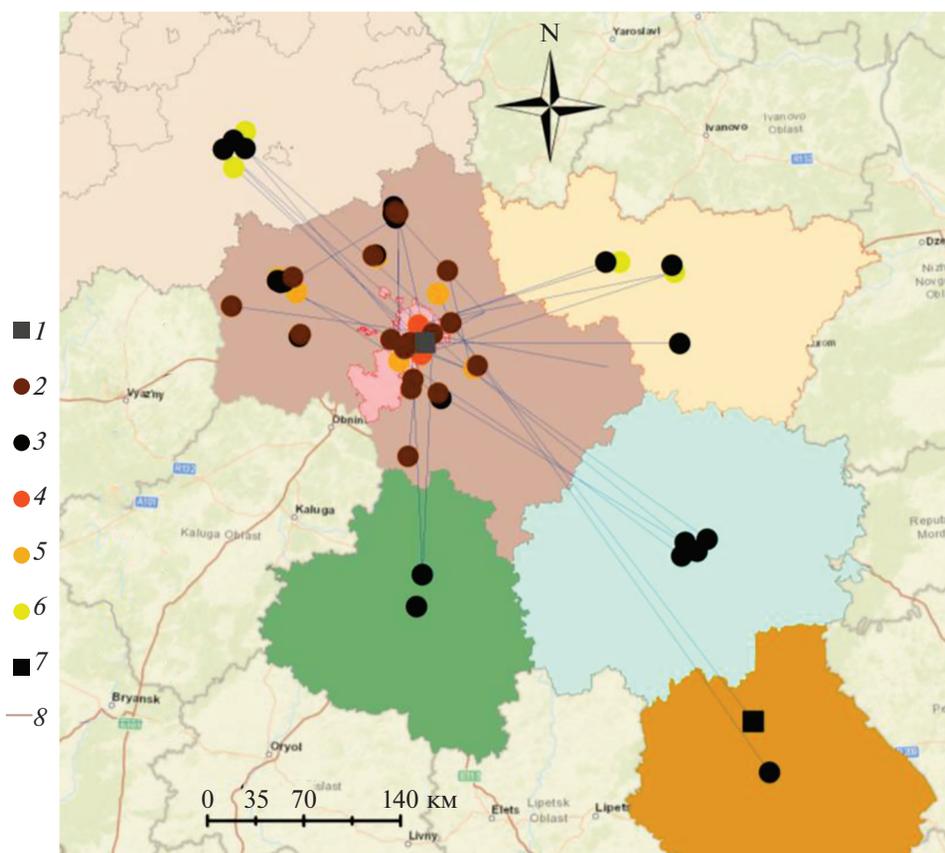
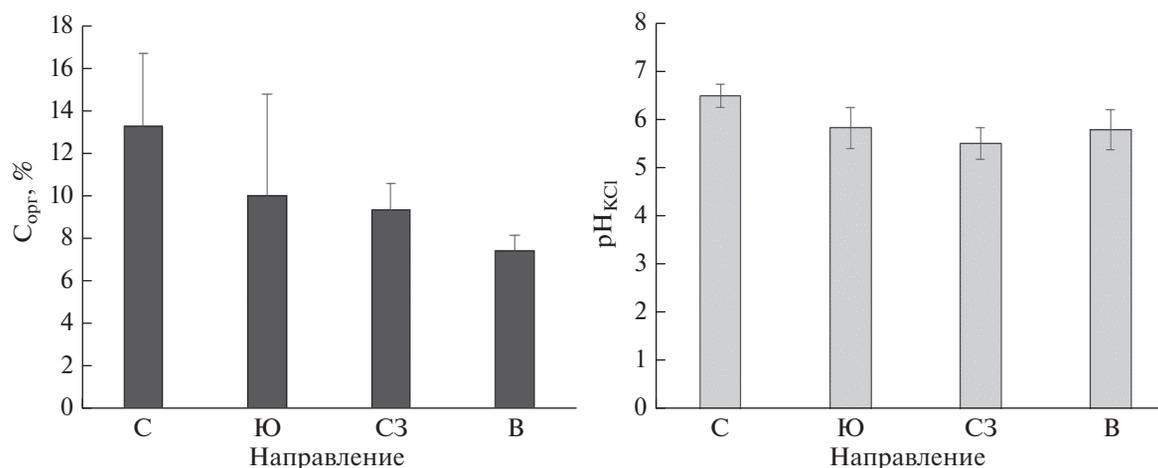


Рис. 3. Структура поставок основных компонентов почвогрунтов: 1 – ОСВ, 2 – грунт растительный, 3 – торф низинный, 4 – грунт котлованный, 5 – песок, 6 – торф верховой, 7 – чернозем, 8 – пути доставки.



**Рис. 4.** Содержание  $C_{\text{орг}}$  (А) и значения  $\text{pH}_{\text{KCl}}$  (Б), усредненные по основным направлениям поставок торфов как компонента почвогрунтов (С – северное направление (Дмитровский и Солнечногорский районы); Ю – южное направление (Тулская Тамбовская области); СЗ – северо-западное направление (Волоколамский и Рузский районы, Тверская область); В – восточное направление (Владимирская и Рязанская области)).

что, по-видимому, объясняется производственными причинами варьирования  $\text{pH}_{\text{KCl}}$ , связанными, с использованием торфа различной степени разложения. В среднем почвогрунты, поставляемые в 2017 г. характеризовались более легким гранулометрическим составом и более кислой средой, хотя статистически значимых различий между годами не выявлено ( $t$ -тест;  $p > 0.05$ ) (табл. 2).

По сравнению с другими показателями содержание  $C_{\text{орг}}$  отличалось высоким разнообразием — при медианном значении 7.0% коэффициент вариации составил 75% (для остальных показателей — менее 25%). Большая часть (80% от общей выборки) находилась в диапазоне от 5 до 15%  $C_{\text{орг}}$ . Однако для 6% случаев показаны значения  $C_{\text{орг}}$  более 30%, что значительно превышает даже нормативные показатели [15]. Высокую неоднородность содержания  $C_{\text{орг}}$  можно считать характерной особенностью городских почв [38, 39]. Поступление углерода с почвогрунтами, различными по свойствам и происхождению, считается одним из основных факторов пространственной неоднородности запасов углерода в городских почвах [5, 50]. Основной причиной неоднородности содержания  $C_{\text{орг}}$  в самих почвогрунтах является различный состав и происхождение их компонентов.

Так, наиболее среднее содержание органического углерода показано для почвогрунтов, содержащих торф, поставляемый с северного направления (Дмитровский и Солнечногорский районы). Почвогрунты, торфяной компонент которых поставлялся с восточного направления (Владимирская и Рязанская области), содержали в среднем на 3–4% меньше органического углерода по сравнению с северным и северо-западным направлениями (рис. 4).

**Прогнозирование запасов углерода в почвенных конструкциях Московского мегаполиса по данным свойств и объемов поставляемых почвогрунтов.** Принимая во внимание, что значительная часть поверхностных горизонтов почвенных конструкций озелененных территорий Москвы формируется из ввозимых почвогрунтов, можно дать прогнозную оценку запасов углерода в этих горизонтах на основании данных объемов поставок и свойств почвогрунтов. Суммарно за два года компании-поставщики, принявшие участие в исследовании, завезли в Москву 2.7 млн м<sup>3</sup> почвогрунтов, что при средней мощности органогенного горизонта RAT в 10 см достаточно для озеленения и благоустройства территории в 27 км<sup>2</sup>. Это соответствует 28% от площади всех газонов дворовых

**Таблица 2.** Свойства почвогрунтов, используемых для создания почвенных конструкций в Московском мегаполисе в 2016 и 2017 гг.

Свойство	2016	2017	Нормативные значений для создания и ремонта газонов (ПП-514)
$\text{pH}_{\text{KCl}}$	$6.2 \pm 0.3$	$5.7 \pm 0.2$	5.0–7.5
$C_{\text{орг}}$ , %	$7.0 \pm 1.1^*$	$13.3 \pm 2.2$	5.8–11.6
Физическая глина, %	$23.6 \pm 1.1$	$20.3 \pm 1.6$	15–25

\* Статистически значимые различия средних значений между годами ( $t$ -test,  $p < 0.05$ ).

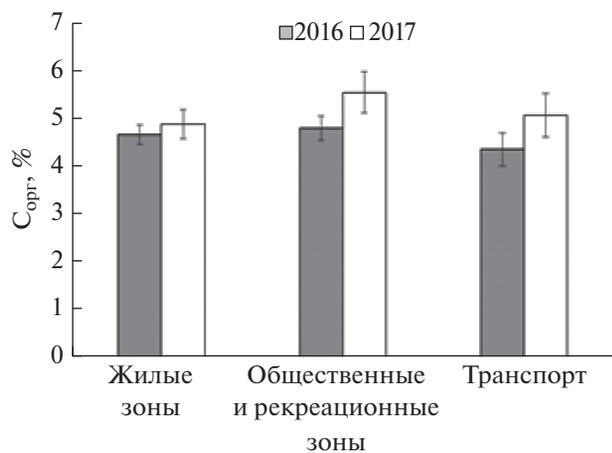


Рис. 5. Содержание  $C_{орг}$  в слое 0–20 см почв различных функциональных зон г. Москва (среднее и ошибка среднего) в 2016 и 2017 гг.

территорий г. Москвы и в 1.5 раза превышает площадь газонов, находящихся на балансе ГБУ “Автомобильные дороги” [7]. Средневзвешенное содержание органического углерода, рассчитанное за два года с учетом объемов поставок и свойств грунта, составило 7.7%. Значения по годам составили 6.9% в 2016 и 8.1% в 2017. При расчетном значении плотности почвы  $1.1 \text{ г/см}^3$  запасы углерода в слое 0–10 см составят 84 т/га. Эти значения в 1.5–2 раза превышают полученные ранее оценки для Москвы [3, 53]. Что объяснимо, принимая во внимание, что предыдущие оценки учитывали все незапечатанные территории мегаполиса, а не только почвенные конструкции, где содержание органического углерода в большинстве случаев выше, чем, например, в почвах городских лесопарков.

Для оценки адекватности прогнозирования запасов углерода в почвенных конструкциях по данным объемов и свойств почвогрунтов полученные результаты были сопоставлены с результатами анализа проб, отобранных в 192 и 190 точках в 2016 и 2017 гг. соответственно, равномерно распределенных по территории города и являющихся частью программы мониторинга состояния почв Москвы. Результаты полевого обследования показали высокую пространственную неоднородность содержания  $C_{орг}$  с коэффициентом вариации 60–80%. Такое варьирование в целом характерно для свойств городских почв [2, 46, 62], особенно для запасов углерода [5, 34, 46], на которые воздействует множество естественных (климат, тип растительности) и антропогенных (тип почвогрунта, технология конструирования, внесение удобрений) факторов. Средние значения различались как для административных округов (максимальные значения в центральном округе), так и для функциональных зон (рис. 5). Однако различия в основном были статистически незна-

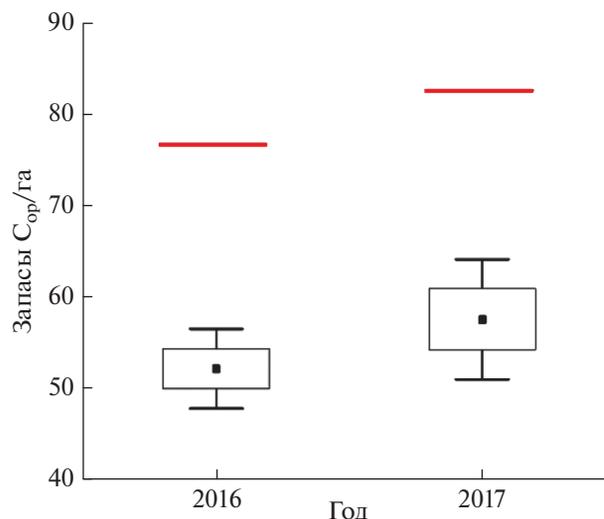


Рис. 6. Оценка удельных запасов  $C_{орг}$  в слое 0–10 см почвенных конструкций Московского мегаполиса по данным полевого обследования (график *Box&Whiskers* отражает среднее, ошибку среднего и 95%-ный доверительный интервал) по сравнению с оценкой по данным свойств и объема поставок почвогрунтов (красные линии – средневзвешенное значение).

чимыми из-за высокого внутреннего разнообразия. Запасы органического углерода в слое 0–10 см составили  $48 \pm 2$  и  $58 \pm 3$  т/га в 2016 и в 2017 гг. соответственно. Полученные значения на 30–40% ниже оценок, рассчитанных на основании анализа поставок почвогрунтов (рис. 6).

Частично это можно объяснить глубиной отбора пробы (0–20 см), вследствие чего средние значения в расчетном слое 0–10 см, скорее всего, занижаются. Тем не менее, глубина 0–20 см является стандартной для мониторинга состояния почв в Москве и большинстве других городов мира (например, в Риме – 20 см, в Нью-Йорке – 6 дюймов (15.2 см) [25]) и данные о состоянии городских почв, как правило, приводятся для этой глубины. Безусловно, объем поставок почвогрунтов, сертифицируемых АНО “Московский экологический регистр” составляет не более половины от общего объема завозимых в Москву грунтов, и экстраполяция полученных данных на всю территорию города сопряжена со значительной неопределенностью в оценке. Наконец, сложно предположить, что в 2016–2017 гг. произошла полная замена поверхностного горизонта, в связи с чем насыпные горизонты многих изученных почвенных конструкций сформированы при более ранних поставках. В то же время нельзя не отметить, что в абсолютных значениях оценки, полученные по данным мониторинга и на основании расчетов, отличаются не более, чем на 25–30 т/га, что для оценок запасов углерода очень немного. Например, обзорные статьи по запасам углерода в городских почвах мира [30, 38, 39, 43] отражают

разброс в 50 т/га и более. Интересно отметить схожую динамику запасов по данным мониторинга и расчетным данным, показавшим увеличение на 10 и 14% соответственно в 2017 по сравнению с 2016 г.

**Роль почвенных конструкций в формировании запасов углерода в городских почвах.** Основной причиной несовпадения прогнозных и экспериментальных оценок запасов  $C_{орг}$  в почвенных конструкциях является, очевидно, сложность и разноплановость процессов вовлечения органического вещества, поступающего с почвогрунтами, в цикл углерода городских почв. В короткой перспективе внесение обогащенных углеродом субстратов приводит к быстрому увеличению запасов  $C_{орг}$  в верхнем горизонте. Однако этот эффект, как правило, непродолжителен из-за быстрой минерализации [26, 49]. Основным результатом станет всплеск эмиссии парниковых газов [32], а запасы углерода практически не увеличатся, а теоретически могут даже сократиться из-за прайминг-эффекта [27, 33]. В долгосрочной перспективе грамотное использование почвогрунтов с умеренным содержанием  $C_{орг}$  для повышения плодородия городских почв и устойчивости газонов и зеленых насаждений к антропогенной нагрузке будет способствовать постепенному накоплению запасов углерода за счет прироста корневой биомассы и гумификации [24, 45, 57]. Таким образом, количество  $C_{орг}$ , поступающего с ввозимыми почвогрунтами, нельзя автоматически прибавлять к запасам углерода в почве. Скорее, его стоит рассматривать как важный фактор, который может воздействовать на процессы и накопления, и минерализации углерода в городских почвах и в зависимости от стратегии использования активизирует один из этих процессов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создание почвенных конструкций становится неотъемлемой частью городского озеленения и благоустройства. Выбор рецептуры и характеристик почвогрунтов из большого разнообразия вариантов, доступных на рынке, во многом определяет важные экологические функции почвенных конструкций, в первую очередь накопление и устойчивость запасов углерода. Анализ поставляемых в Москву почвогрунтов и их компонентов по данным анкетирования крупных компаний-поставщиков позволил получить представление об объемах поставок и неоднородности свойств грунтов. За два года в Москву было ввезено 2.7 млн т почвогрунтов — объем, достаточный для озеленения трети всех газонов дворовых территорий города. При схожей рецептуре содержание органического углерода в почвогрунтах варьировало от 2 до 32% в зависимости от места добычи и производства компонентов почвогрунтов. Исходя из свойств

поставляемых грунтов, прогнозные оценки средне-взвешенных запасов углерода в слое 0–10 см почвенных конструкций составили 84 т/га, что сопоставимо с оценками детального полевого обследования 2016–2017 гг. Более того, для прогнозной и экспериментальной оценок показана аналогичная динамика по годам (увеличение на 10–14% в 2017 по сравнению с 2016 г.). Принимая во внимание важную роль почвогрунтов в формировании запасов углерода в городских почвенных конструкциях, анализ и регулирование структуры поставок почвогрунтов, мониторинг и нормирование их свойств является важным инструментом воздействия на экологическое состояние и функции почв города.

## БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы выражают признательность аспирантам департамента ландшафтного проектирования и устойчивых экосистем О.Н. Ромзайкиной и С.А. Деминой за помощь в проведении лабораторных анализов и участие в подготовке статьи. В работе использованы данные государственного экологического мониторинга ГПБУ “Мосэкомониторинг”.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Анализ баланса и свойств почвогрунтов выполнен при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 19-77-30012. Анализ запасов углерода в Московском мегаполисе по данным полевых исследований проведен при финансовой поддержке гранта РФФИ № 18-35-20052. Статья подготовлена при поддержке “Программы РУДН 5-100”.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белов Д.А., Белова Н.К. Состояние насаждений на Бульварном кольце г. Москвы // Лесной вестник/Forestry bulletin. 2015. Т. 19. № 1. 152–161.
2. Васнев В.И., Ван Ауденховен А.П., Ромзайкина О.Н., Гаджагаева Р.А. Экологические функции и экосистемные сервисы городских и техногенных почв: от теории к практическому применению (обзор) // Почвоведение. 2018. № 10. С. 1177–1191.
3. Васнев В.И., Прокофьева Т.В., Макаров О.А. Разработка подхода к оценке запасов почвенного органического углерода мегаполиса и малого населенного пункта // Почвоведение. 2013. № 6. С. 725–736.
4. Водяницкий Ю.Н. Загрязнение почв тяжелыми металлами и металлоидами и их экологическая опасность (аналитический обзор) // Почвоведение. 2013. № 7. С. 872–881.
5. Водяницкий Ю.Н. Органическое вещество в городских почвах (обзор литературы) // Почвоведение. 2015. № 8. С. 921–931.
6. Воробьева Л.А. Химический анализ почв. М.: Изд-во Моск. ун-та. 1998. С. 272.
7. Департамент экономической политики и развития города Москвы. 2017. Сводный отчет о результатах проведения оценки фактического воздействия по-

- становления Правительства Москвы от 25.02.2015 № 74-ПП “О внесении изменений в постановление Правительства Москвы от 9 ноября 1999 г. № 1018, от 10 сентября 2002 г. № 743-ПП”.
8. Добровольский Г.В., Никитин Е.Д. Экология почв. Учение об экологических функциях почв. М.: Изд-во Моск. ун-та. 2012. С. 413.
  9. Закон города Москвы от 4 июля 2007 года № 31 О городских почвах (с изменениями на 20 февраля 2019 года).
  10. Курбатова А.С., Башкин В.Н., Баранникова Ю.А., Герасимова С.Г., Никифорова Е.В., Решетина Е.В., Савельева В.А., Савин Д.С., Смагин А.В., Степанов А.Л. Экологические функции городских почв. Смоленск: Маджента. 2004. С. 232.
  11. Лысак Л.В. Бактериальные сообщества городских почв. Автреф. ... докт. биол. наук. М., 2010. 46 с.
  12. Махрова Т.Г., Сапелин А.Ю. Древесные интродуценты в составе насаждений ВДНХ // Лесной вестник. 2016. Т. 20(1). С. 140–146.
  13. Никифорова Е.М., Касимов Н.С., Кошелева Н.Е. Многолетняя динамика антропогенной солончеватости почв ВАО Москвы при использовании противогололедных реагентов // Почвоведение. 2017. № 1. С. 93–104.
  14. Постановление 743-ПП “Правила создания, содержания и охраны зеленых насаждений города Москвы” от 10.09.2002 (с поправками от 17.06.2011).
  15. Постановление Правительства Москвы № 514-ПП “О повышении качества почвогрунтов в городе Москве” от 27.07.2004 (с поправками от 01.06.2018).
  16. Прокофьева Т.В., Мартыненко И.А., Иванников Ф.А. Систематика почв и почвообразующих пород Москвы и возможность их включения в общую классификацию // Почвоведение. 2011. № 5. С. 611–623.
  17. Прохоров И.С. Мониторинг состояния почв города Москвы и предложения по их рекультивации // Почвоведение и агрохимия. 2015. № 1. С. 61–68.
  18. Прохоров И.С., Карев С.Ю. Особенности производства почвогрунтов для озеленения и благоустройства города Москвы // Агрохимический вестник. 2012. № 3. С. 21–25.
  19. Рысин Л.П., Савельева Л.И., Рысин С.Л. Мониторинг лесов на урбанизированных территориях // Экология. 2004. № 4. С. 243–248.
  20. Смагин А.В. Теория и практика конструирования почв. М.: Изд-во Моск. ун-та. 2012. С. 544.
  21. Смагин А.В., Садовникова Н.Б. Создание почвоподобных конструкций // Почвоведение. 2015. № 9. С. 1112–1123.
  22. Строганова М.Н., Мягкова А.Д., Прокофьева Т.В. Роль почв в городских экосистемах // Почвоведение. 1997. № 1. С. 96–101.
  23. Хайрулина Е.А., Тимофеев И.В., Кошелева Н.Е. Потенциально токсичные элементы в почвах Индустриального района г. Перми // Географический вестник. 2019. № 2(49).
  24. Acuna E., Alejandra A., Pastenes V., Villalobos G. Carbon sequestration and photosynthesis in newly established turfgrass cover in central Chile // Agronomy J. 2017. V. 109(2). P. 397–405.
  25. Ajmone-Marsan F., Biasioli M. Trace elements in soils of urban areas // Water. Air. Soil Pollut. 2010. V. 213. P. 121–143.
  26. Allaire S.E., Dufour-L'Arrivée C., Lafond J.A., Lalan-cette R., Brodeur J. Carbon dioxide emissions by urban turfgrass areas. Canadian // J. Soil Science. 2008. V. 88(4). P. 529–532.
  27. Blagodatskaya E., Kuzyakov Y. Mechanisms of real and apparent priming effects and their dependence on soil microbial biomass and community structure: critical review // Biol. Fertil. Soils. 2008. V. 45. P. 115–131.
  28. Brose D.A., Hundal L.S., Oladeji O.O., Kumar K., Granato T.C., Cox A., Abedin Z. Greening a steel mill slag brownfield with biosolids and sediments: A case study // J. Environ. 2016. V. 45. P. 53–61.
  29. Burghardt W. Soils in urban and industrial environments // Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde. 1994. V. 157(3). P. 205–214.
  30. Cambou A., Shaw R.K., Huot H., Vidal-Beaudet L., Hunaault G., Cannavo P., Nold F., Schwartz C. Estimation of soil organic carbon stocks of two cities, New York City and Paris // Sci. Total Environ. 2018. V. 644. P. 452–464.
  31. Cekstere G., Nikodemus O., Osvalde A. Toxic impact of the de-icing material to street greenery in Riga // Latvia Urban Forestry and Urban Greening. 2008. V. 7(3). P. 207–217.
  32. Decina M., Hutyra L.R., Gatley C.K., Getson J.M., Reinmann A.B., Short Gianotti A.G., Templer P.H. Soil respiration contributes substantially to urban carbon fluxes in the greater Boston area // Environ. Poll. 2016. V. 212. P. 433–439.
  33. Ditterich F., Poll C., Pronk G.J., Heister K., Chandran A., Rennert T., Kögel-Knabner I., Kandeler E. Succession of soil microbial communities and enzyme activities in artificial soils // Pedobiologia. 2016. V. 59. P. 93–104.
  34. Dmitrakova J., Abakumov E. Dynamics of soil organic carbon of reclaimed lands and the related ecological risks to the additional CO<sub>2</sub> emission // Springer Geography. 2019. P. 97–105.
  35. Fourvel G., Vidal-Beaudet L., Le Bocq A., Brochier V., Théry F., Landry D., Kumarasamy T., Cannavo P. Early structural stability of fine dam sediment in soil construction // J. Soils Sediments. 2018. V. 18. P. 2647–2663.
  36. Kumar K., Hundal L.S. Soil in the city: Sustainably improving urban soils // J. Environ. Quality. 2016. V. 45. P. 2–8.
  37. Levin M.J., Kim K.-H.J., Morel J.L., Burghardt W., Charzynski P., Shaw R.K. (eds). Soils within Cities. Global approaches to their sustainable management – composition, properties, and functions of soils of the urban environment. Schweizerbart Science Publ., 2017. P. 159–168.
  38. Lorenz K., Lal R. Biogeochemical C and N cycles in urban soils // Environ. Int. 2009. V. 35. P. 1–8.
  39. Lorenz K., Lal R. Managing soil carbon stocks to enhance the resilience of urban ecosystems // Carbon Management. 2015. V. 6. P. 35–50.
  40. McKinney M.L. Urbanization as a major cause of biotic homogenization. // Biological Conservation. 2006. V. 127. P. 247–260.
  41. Morel J.L., Chenu C., Lorenz K. Ecosystem services provided by soils of urban, industrial, traffic, mining, and military areas (SUITMAS) // J. Soils Sediments. 2015. V. 15(8). P. 1659–1666.
  42. Prokofeva T.V., Rozanova M.S., Kiriushin A.V. The technosols on 60–70 year-old technogenic deposits of the Lomonosov Moscow state university campus // Springer Geography. 2019. P. 31–41.

43. Pouyat R.V., Yesilonis I.D., Nowak D.J. Carbon storage by urban soils in the United States // *J. Environ. Quality*. 2006. V. 35. P. 566–75.
44. Pouyat R.V., Yesilonis I.D., Dombos M. et al. A Global Comparison of Surface Soil Characteristics Across Five Cities // *Soil Science*. 2015. V. 180. P. 136–145.
45. Qian Y.L., Follett R.F. Assessing soil carbon sequestration in turfgrass systems using long-term soil testing data // *Agronomy J.* 2002. V. 94. P. 30–935.
46. Raciti S., Groffman P., Jenkins J., Pouyat R., Fahey T., Pickett S., Cadenasso M. Accumulation of Carbon and Nitrogen in Residential Soils with Different Land-Use Histories // *Ecosystems*. 2011. V. 14. P. 287–297.
47. Rakshit A. (ed.). Adaptive soil management: from theory to practices. Springer, 2017. P. 571.
48. Sarzhanov D.A., Vasenev V.I., Vasenev I.I., Sotnikova Y.L., Ryzhkov O.V., Morin T. Carbon stocks and CO<sub>2</sub> emissions of urban and natural soils in Central Chernozemic region of Russia // *Catena*. 2017. V. 158. P. 131–140.
49. Townsend-Small A., Czimeczik C.I. Carbon sequestration and greenhouse gas emissions in urban turf // *Geophys. Res. Lett.* 2010. V. 37(2). P. L02707.
50. Vasenev V., Kuzyakov Y. Urban soils as hot spots of anthropogenic carbon accumulation: Review of stocks, mechanisms and driving factors // *Land Degradation and Development*. 2018. V. 29(6). P. 1607–1622.
51. Vasenev V.I., Morel J.L., Nehls T., Shaw R.K., Kim K.J., Hajiaghayeva R.A. Preface // *J. Soils Sediments*. 2019. V. 19(8). P. 3123–3126.
52. Vasenev V.I., Smagin A.V., Ananyeva N.D., Ivashchenko K.V., Gavrilenko E.G., Prokofeva T.V., Patlseva A., Stoorvogel J.J., Gosse D.D., Valentini R. Urban Soil's Functions: Monitoring Assessment and Management. Singapore: Springer, 2017. P. 359–409.
53. Vasenev V.I., Stoorvogel J.J., Vasenev I.I., Valentini R. How to map soil organic carbon stocks in highly urbanized regions? // *Geoderma*. 2014. V. 226–227. P. 103–115.
54. Vidal-Beaudet L., Schwartz C., Sere G. et al. Using wastes for fertile urban soil construction – The French Research Project SITERRE, 2017.
55. Wiesmeier M., Urbanski L., Hobley E., Lang B., von Lützw M., Marin-Spiotta E., van Wesemael B., Rabot E., Ließ M., Garcia-Franco N., Wollschläger U., Vogel H.-J., Kögel-Knabner I. Soil organic carbon storage as a key function of soils – A review of drivers and indicators at various scales // *Geoderma*. 2019. V. 333. P. 149–162.
56. Yang J.-L., Zhang G.-L. Formation, characteristics and eco-environmental implications of urban soils. A review // *Soil Sci. Plant Nutrition*. 2016. V. 61. P. 30–46.
57. Zirkle G., Lal R., Augustin B. Modeling carbon sequestration in home lawns // *HortScience*. 2011. V. 46. P. 808–814.

## Analysis of Imported Soils and for Predicting Carbon Stocks in the Soil Structures of Moscow Metropolis

**I. P. Brianskaia<sup>1,\*</sup>, V. I. Vasenev<sup>1</sup>, R. Brykova<sup>1</sup>, V. N. Markelova<sup>2</sup>, N. V. Ushakova<sup>2</sup>,  
D. D. Gosse<sup>3</sup>, E. V. Gavrilenko<sup>4</sup>, and E. V. Blagodatskaya<sup>5</sup>**

<sup>1</sup>*Department of Landscape Design and Sustainable Ecosystems, Peoples' Friendship University of Russia, Moscow, 117198 Russia*

<sup>2</sup>*Moscow Environmental Register, Moscow, 119019 Russia*

<sup>3</sup>*Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119191 Russia*

<sup>4</sup>*Department of Nature Management and Environmental Protection of the City of Moscow, Moscow, 119019 Russia*

<sup>5</sup>*Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf (HZDR), Halle, Germany*

\*e-mail: inna.bryanskaya@bk.ru

An increase in the area of landscaping in modern cities makes it particularly important to study the properties and functions of soil structures. Carbon sequestration is one of the main ecological functions of soils, which is actively studied for the soils of natural and agroecosystems, while little is known for urban and human-constructed soils. Carbon stocks in urban soils and, in particular, in soil structures are formed under the dominant influence of anthropogenic factors and are characterized by the high and difficult to predict heterogeneity. One of the main factors that determine the carbon pools of soil structures in Moscow metropolis is the volume and properties of imported soils. In this study, the market of soils supplied to Moscow for landscaping purposes in 2016 and 2017 is considered on the basis of special surveys of supplier companies; sources and volumes of supplied soils and their components are determined, and recipes for their preparation and properties are analyzed. Based on the results obtained, the predicted average organic carbon stock in the upper 10 cm of urban soils is 84 t/ha. A comparison of the obtained estimates with the results of a field survey of a representative sample of Moscow soil monitoring points ( $n > 190$ ) shows that the predicted value is overestimated by 1.5–2.0 times. At the same time, a relatively small absolute excess (by 30–40 t/ha) and similar dynamics of calculated and studied reserves over the years (an increase by 10–14% in 2017 compared to 2016) confirm the assumption of the determining role of imported soils in the formation of carbon reserves of Moscow's soil structures and emphasize the importance of monitoring and rationing the properties of imported soils as the basis for sustainable development of urban ecosystems.

**Keywords:** urban and anthropogenic soils, soil ecological functions, ecosystem services, constructozems, sustainable development of the city