

# СОДЕРЖАНИЕ

---

---

Номер 6, 2022

---

---

Проблемы размещения твердых коммунальных отходов и оценка риска на примере Центрального Федерального округа России

*В. Н. Бурова, И. В. Козлякова, О. Н. Еремина*

3

---

## ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

Палеосейсмичность Южного Прииссыккуля и геоэкологические проблемы Каджи-Сайского уранового хвостохранилища (Кыргызская Республика)

*Л. А. Корженкова, А. М. Корженков, В. М. Макеев*

17

Моделирование морфологических особенностей абразионных берегов с развитием оползневых процессов в криолитозоне

*А. С. Викторов*

28

Интегральная оценка суффозионной опасности территории Бугульминского плато Бугульминско-Белебеевской возвышенности

*А. И. Латыпов, А. Н. Гараева, О. В. Лунева, Э. А. Королев*

37

---

## ЗАГРЯЗНЕНИЕ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

Оценка токсичности снежного покрова придорожных территорий г. Владимир

*Т. А. Трифонова, Ю. Н. Курбатов, И. Н. Курочкин, О. В. Савельев,  
О. Г. Селиванов, А. А. Марцев*

46

---

## УТИЛИЗАЦИЯ И ЗАХОРОНЕНИЕ ОТХОДОВ

Выщелачивание загрязняющих веществ из продуктов механико-биологической обработки твердых коммунальных отходов: состав фильтрата, допустимость захоронения на полигонах ТКО

*Т. И. Юганова*

57

---

## ГРУНТОВЕДЕНИЕ И МЕХАНИКА ГРУНТОВ

Характер деформирования глинистых грунтов с позиций физико-химической теории эффективных напряжений

*Ф. С. Карпенко*

76

---

## МЕТОДОЛОГИЯ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Индекс геоэкологической безопасности городов России: критерии, показатели, оценка

*Е. В. Булдакова, В. Г. Заиканов, Т. Б. Минакова, Ю. П. Проккопенко*

87

---

---

# Contents

---

---

**Number 6, 2022**

---

---

Problems in municipal solid waste disposal and risk assessment by the example of the Central Federal region, Russia

*V. N. Burova, I. V. Kozlyakova, O. N. Eremina*

3

---

## **NATURAL AND HUMAN-INDUCED PROCESSES**

Paleoseismicity of the southern Issyk-Kul Lake region and geoecological problems of the Kadzhi-Sai uranium tailing facility (Kyrgyz Republic)

*L. A. Korzhenkova, A. M. Korzhenkov, V. M. Makeev*

17

Modeling morphological features of abrasion landslide coasts in cryolithozone

*A. S. Victorov*

28

Integral assessment of the suffosion hazard at the Bugulma plateau, the Bugulma-Belebey upland

*A. I. Latypov, A. N. Garaeva, O. V. Luneva, E. A. Korolev*

37

---

## **ENVIRONMENT CONTAMINATION**

Assessment of snow cover toxicity in the roadside territories of Vladimir

*T. A. Trifonova, Yu. N. Kurbatov, I. N. Kurochkin, O. V. Savel'ev, O. G. Selivanov, A. A. Martsev*

46

---

## **UTILIZATION AND DISPOSAL OF WASTE**

Leaching of pollutants out of the products of mechanical-biological treatment of municipal solid waste: leachate composition and admissibility of disposal at MSW landfills

*T. I. Yuganova*

57

---

## **SOIL AND ROCK ENGINEERING AND MECHANICS**

The mode of clay soil deformations from the standpoint of physicochemical theory of effective stresses

*F. S. Karpenko*

76

---

## **RESEARCH METHODS AND TECHNIQUES**

Geoenvironmental safety index of Russian cities: criteria, indicators and assessment

*E. V. Buldakova, V. G. Zaikanov, T. B. Minakova, Yu. P. Prokopenko*

87

---

---



УДК 628.4.02

## ПРОБЛЕМЫ РАЗМЕЩЕНИЯ ТВЕРДЫХ КОММУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ И ОЦЕНКА РИСКА НА ПРИМЕРЕ ЦЕНТРАЛЬНОГО ФЕДЕРАЛЬНОГО ОКРУГА РОССИИ

© 2022 г. В. Н. Бурова<sup>1,\*</sup>, И. В. Козлякова<sup>1,\*\*</sup>, О. Н. Еремина<sup>1</sup><sup>1</sup> Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН,  
Уланский пер., 13, стр. 2, Москва, 101000 Россия

\*E-mail: valentina\_burova@mail.ru

\*\*E-mail: ivk.geoenv@yandex.ru

Поступила в редакцию 24.08.2022 г.

После доработки 01.09.2022 г.

Принята к публикации 05.09.2022 г.

На основании проведенного анализа отечественных и зарубежных научных исследований, направленных на решение проблемы безопасного размещения твердых коммунальных отходов (ТКО), показано, что недостаточно внимания уделяется предварительной оценке риска территорий в связи с размещением объектов ТКО. Разработаны методические принципы оценки интегральной природно-техногенной опасности и риска территорий административных субъектов Центрального Федерального округа России (ЦФО) от расположенных там санкционированных и несанкционированных объектов твердых коммунальных отходов. Факторы, отвечающие за формирование риска, включают как природную, так и техногенно-социальную составляющие, в качестве которых для целей и в масштабе данного исследования выбраны: геологическое строение массива, опасные природные (гидрометеорологические) процессы, число полигонов и свалок ТКО в конкретной административной области, плотность населения. Сравнительная качественная характеристика геологического риска как величины вероятного экономического и социального ущерба от негативного воздействия объектов ТКО на геологическую среду подсчитана в баллах для каждой из 17 областей ЦФО. Выполненная оценка носит обзорный характер и предназначена для органов федерального управления, планирующих инвестиции в решение проблемы размещения отходов в России.

**Ключевые слова:** размещение твердых коммунальных отходов, полигоны ТКО, оценка природно-техногенной опасности, геологический риск, геологическое строение массива, опасные природные процессы, ЦФО РФ

DOI: 10.31857/S0869780922060030

### ВВЕДЕНИЕ. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ РАЗМЕЩЕНИЯ ОБЪЕКТОВ ТКО

В настоящее время обращение с отходами производства и потребления в целях предотвращения их вредного воздействия на окружающую среду и здоровье человека, а также вовлечение таких отходов в хозяйственный оборот в качестве дополнительных источников сырья, является актуальной проблемой не только в России, но и во всем мире. Особое внимание специалистов уделяется разработке способов безопасной утилизации и захоронения отходов, оценке экологического состояния территорий и влияния объектов размещения отходов на окружающую среду и социум [12]. Согласно Федеральному закону РФ “Об отходах производства и потребления” № 89-ФЗ от 24.06.1998 г. с внесенными в последующие го-

ды изменениями и дополнениями<sup>1</sup>, “под объектом размещения (захоронения или хранения) отходов понимается специально оборудованное сооружение, которое обустроено в соответствии с требованиями законодательства в области охраны окружающей среды и обеспечения санитарно-эпидемиологического благополучия населения и предназначено для долгосрочного (более 11 месяцев) складирования отходов в целях их последующей утилизации, обезвреживания, захоронения”. Хранение отходов потребления (ТКО) производится на санитарных полигонах, на которых обеспечивается соблюдение технологии складирования, предусмотрено наличие инженерных сооружений и осуществляется контроль влияния на объекты

<sup>1</sup> Федеральный Закон “Об отходах производства и потребления” № 89-ФЗ от 24.06.1998 (ред. от 29.07.2018). <http://www.kremlin.ru/acts/bank/12555>.

окружающей среды в соответствии с требованиями нормативных документов<sup>2</sup>.

Однако на практике в России, помимо таких специально оборудованных полигонов ТКО, отвечающих нормативным требованиям, существуют иные категории объектов размещения ТКО [15]:

1) санкционированные необорудованные захоронения ТКО, которые хотя и введены в эксплуатацию с соблюдением нормативов размещения объекта по санитарным и геолого-гидрологическим критериям (при размещении отходов проводится послойное уплотнение, в некоторых случаях, без изоляции слоев, окончательная засыпка рабочей поверхности захоронения завершает эксплуатацию объекта), но при этом регулярные наблюдения за полигоном не проводятся;

2) стихийные свалки, образованные без проведения инженерно-экологических изысканий на территории, отведенной под размещение отходов, и минимальными экономическими затратами на этапах эксплуатации и закрытия объекта; отходы размещены насыпью без уплотнения и изоляции, а само захоронение и зона его влияния в течение длительного времени не контролируются;

3) замусоренные территории, часто возникающие стихийно в понижениях рельефа.

По данным Росприроднадзора, число специально обустроенных полигонов захоронения ТКО в 5 раз меньше, чем санкционированных свалок. Число несанкционированных свалок в 2.5 раза превышает количество санкционированных объектов захоронения отходов. [8, 17]. По подсчету аналитической службы аудиторско-консалтинговой сети FinExpertiza, только в 2021 г. количество несанкционированных свалок ТКО увеличилось в России на 9.1%, или на 1.33 тыс. объектов в 56 из 85 российских регионов<sup>3</sup>.

Стихийно возникающие свалки и замусоренные территории, не отвечающие нормативным правилам организации и эксплуатации объектов ТКО, представляя собой серьезные источники опасности для окружающей природной среды и социума. По мнению исследователей, их следует расценивать как уже накопленный экологический ущерб [8]. Но и оборудованные полигоны захоронения ТКО следует рассматривать как природно-технические системы, представляющие угрозу экологической и социальной безопасности и относящиеся к объектам повышенного риска.

<sup>2</sup> СП 320.1325800.2017. Полигоны для твердых коммунальных отходов. Проектирование, эксплуатация и рекультивация. М.: Стандартинформ, 2018. <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293739/4293739224.htm> (дата обращения 15.08.2022).

<sup>3</sup> <https://finexpertiza.ru/press-service/researches/2022/kol-stikh-sval-vyroslo/> (дата обращения 15.08.2022).

Полигоны захоронения ТКО претерпевают значительные изменения за время их существования и развиваются по различным сценариям [11]. Но даже при условии прохождения этих сценариев в штатном режиме всегда генерируются многочисленные риски [3, 9]. А.А. Музалевский отмечает, что наиболее опасными по уровню социальных и экологических последствий являются сценарии, связанные с фильтрацией содержимого полигонов в подземные и поверхностные воды, а также с загрязнением атмосферного воздуха. При этом, по мнению автора, опасность представляют как существующие, так и старые засыпанные полигоны [10].

Как следует из анализа отечественной и зарубежной научной литературы, в настоящее время исследования, связанные с проблемами размещения ТКО, ведутся в основном по двум направлениям:

1. *Выбор подходящих мест для будущего размещения полигонов ТКО или предприятий по их утилизации.* Сложность проблемы обусловлена, прежде всего, ее мультидисциплинарным характером с большим числом социально-экономических, технологических и экологических аспектов. В последние десятилетия развитие ГИС-технологий и инструментов многокритериального анализа позволило привлечь этот математический аппарат для решения вопроса о выборе мест размещения объектов обращения с отходами. Выбор мест безопасного размещения ТКО проводится с учетом многих факторов на базе метода анализа иерархий (Analytic Hierarchy Process, АНП), предложенного Т. Саати [16], который уже более 30 лет широко применяется в самых различных областях. Многокритериальный метод анализа иерархий сводит комплексную многофакторную проблему к последовательности парных сравнений, которые выявляют вклад разных факторов и их веса, а затем синтезируются в матрицу взаимодействия [20]. Такой подход хорошо зарекомендовал себя во многих странах мира, доказав высокую эффективность в нахождении разумного решения. Исследования при этом ведутся, как правило, в крупном масштабе, на уровне выбора площадок и сводятся к сравнению альтернативных вариантов расположения объектов ТКО [22, 23, 26, 33]. Реже многофакторному анализу на региональном уровне подвергается обширная территория для предварительного оконтуривания перспективных участков расположения объектов ТКО. Такие исследования подразумевают построение карт на основе ГИС путем наложения тематических слоев, включающих данные по социальному (демографическому), экономическому (тип землепользования, характер застройки, степень хозяйственного освоения территорий) и природному (гидрологические, геоморфологические, геологические условия) блокам. Выбор

участков для размещения объектов обращения ТКО осуществляется на основании существующих санитарных правил, которые устанавливают ограничения и запреты на территории размещения полигонов в зависимости от удаленности от населенных пунктов и водных объектов, особенностей рельефа и геолого-гидрогеологических условий. Последовательное наложение ограничений позволяет оконтурить оставшиеся после исключения из рассмотрения участки. Построение таких карт в масштабах 1:25 000–1:100 000 выполнено для различных регионов земного шара, например, для окрестностей индийского города Гухаати [30]; для муниципалитета Панчево [25] и региона Срем [34] в Сербии; для окрестностей Стамбула [27], для различных регионов Ирана [28, 31] и др.

2. *Оценка опасности и риска существующих свалок и полигонов ТКО.* При исследованиях в этом направлении как в нашей стране, так и за рубежом разрабатываются методики определения экологических рисков воздействия уже существующих свалок, в том числе старых, на разные компоненты окружающей среды и человека [21, 24, 29]. Такие методики часто основаны на балльной оценке по группам критериев, учитывающих территориальное размещение объектов, геологические и гидрологические условия среды, техническое обеспечение объектов и т.д. [17, 32]. Так, например, оценке опасности свалок на территории Краснодарского края посвящена работа А.В. Погорелова и Д.А. Липилина [15]. Исследователи провели анализ площадного распределения свалок и полигонов складирования ТБО, ранжируя их по критерию площади (мелкие, средние, крупные) и степени опасности воздействия на ландшафтную среду. Современное геоэкологическое состояние свалок и полигонов твердых бытовых отходов Московской области изучали сотрудники НИУ МГСУ [2]. Г.В. Ильных, В.Н. Коротаев, Я.И. Вайсман (ФГБОУ ВПО «ПНИПУ») предложили алгоритм оценки экологической нагрузки на объекты окружающей среды путем расчета предотвращенного экологического ущерба при реализации различных технологий обращения с ТКО на основании данных об их составе [5].

Примеров подобных исследований, проводимых для конкретных объектов ТКО, много. Меньше внимания уделяется региональной оценке опасности и риска территорий, находящихся под воздействием свалок и полигонов ТКО. В этом направлении проводятся исследования в лаборатории геоэкологии г. Москвы и городских агломераций ИГЭ РАН, коллективом которой разрабатываются методические подходы к оценке опасности в связи с расположенными там свалками ТКО на основе геоэкологического и ландшафтно-экологического анализа Московской области [4]. В основу анализа положено райони-

рование по геоморфологическому признаку: территория Московской области разделена на 5 физико-географических провинций, рельеф и геологическое строение которых во многом определяют условия функционирования свалок ТБО.

Таким образом, анализ публикаций показывает, что, несмотря на значительное число работ, посвященных различным аспектам проблемы размещения полигонов ТКО, региональной оценке риска территорий от уже существующих там санкционированных и несанкционированных объектов ТКО уделяется недостаточно внимания. Исследования проводятся, как правило, в крупном масштабе, либо для изучения экологического воздействия существующих свалок, либо для сравнения альтернатив при выборе мест будущего размещения объектов обращения с отходами. Практически нет работ, посвященных картографированию природно-техногенного риска территорий. Между тем предварительный риск-анализ обширных территорий в мелком масштабе с целью оценки их экологического неблагополучия с учетом существующих свалок представляет собой на сегодняшний день важную задачу.

Ранее авторами были разработаны методологические принципы ранжирования территорий и проведена типизация административных областей Центрального Федерального округа России (ЦФО) по степени благоприятности инженерно-геологических условий для размещения объектов обращения с твердыми коммунальными отходами [6, 7, 14]. Типизация выполнена на основании оценки защищенности геологической среды от загрязнения, поступающего с поверхности. Степень защищенности определяется наличием в геологическом разрезе слабопроницаемых толщ четвертичного и дочетвертичного возраста, глубиной их залегания, мощностью и выдержанностью по простиранию. Проведенная типизация является основой для актуального использования оцениваемой территории при размещении ТКО в будущем с минимальными потерями в различных средах: природной, социальной и экономической.

Но, несомненно, весьма важно иметь представление о том, какую опасность несет в себе современное состояние исследуемых территорий, на которых уже расположены объекты захоронения ТКО, несанкционированные свалки, замусоренные территории, выраженное в показателях риска, как наиболее понятного и специалистам, и лицам, принимающим решения.

В данной статье на примере ЦФО изложена разработанная методика сравнительной оценки интегральной природно-техногенной опасности и природно-техногенно-социального риска от существующих объектов размещения ТКО.

## ПРИНЦИПЫ И ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ РИСКА

Риск, в соответствии с общепринятым методологическим подходом, существует и оценивается при наличии источника опасности и объекта (реципиента), на который эта опасность воздействует [13]. Первоочередная задача сводится к определению источников и реципиентов опасности, а также алгоритма их взаимодействий, т.е. необходимо обозначить определенный уровень информационного описания территории, отвечающий поставленной цели и масштабу исследований.

В качестве конечного таксона оценки риска, связанного с существующими полигонами ТКО, а также санкционированными и несанкционированными свалками, в пределах ЦФО были использованы субъекты округа. В ЦФО входят 17 областей и город федерального значения (Москва). Оценка риска территорий была проведена для областей. На наш взгляд, Москва требует специальных подходов для оценок риска, так как резко отличается от других субъектов и по площади, и по количеству жителей, которые представляют параметры, обуславливающие формирование риска и его оценку.

Для данного исследования, направленного на оценку риска территорий субъектов в пределах ЦФО, информационный уровень (факторы, обуславливающие формирование риска) должны характеризовать как природную, так и техногенно-социальную составляющие исследуемой территории. Среди этих факторов наиболее значимыми в рамках масштаба исследований (1:2 500 000) представляются следующие.

1. Характеристика территории ЦФО по степени благоприятности инженерно-геологических условий для размещения объектов обращения с ТКО.

2. Данные о полигонах размещения ТКО, несанкционированных свалках, замусоренных территориях. Прежде всего их количество и места расположения (территории с определенной степенью благоприятности).

3. Данные об опасных процессах, распространенных в пределах таксонов оценки риска, охарактеризованные через их количество и интенсивность проявления, способные приводить к нештатной ситуации в пределах расположения ТКО.

4. Характеристика таксонов оценки риска по плотности населения как основного объекта, на который воздействует рассматриваемая опасность.

Факторы 1–3 характеризуют потенциальную интегральную природно-техногенную опасность территории, фактор 4 является реципиентом этой интегральной опасности. Исходя из перечисленных выше факторов формирования риска, его можно охарактеризовать как природно-техноген-

но-социальный, который представлен в условных единицах (баллах) [13].

Для оценки риска предложенные факторы его формирования необходимо ранжировать по степени значимости и оценить по балльной шкале. Так как у нас нет данных о закономерностях влияния того или иного предложенного фактора формирования риска на величину негативных последствий, предлагается каждому фактору присвоить баллы от 1 до 30 в зависимости от степени его влияния на величину риска, определяемой на основании экспертных предположений. Такой диапазон значений баллов обусловлен значительной разницей влияния факторов на формирование риска.

Анализ *благоприятности инженерно-геологических условий для размещения* полигонов захоронения ТКО, проведенный по разработанной ранее методике районирования территорий [6, 7, 14], показал, что подавляющая часть территории ЦФО в различной степени неблагоприятна по инженерно-геологическим критериям для размещения ТКО, и поэтому при строительстве полигонов требуется проведение дополнительных мероприятий по защите геологической среды от загрязнения.

В пределах многих областей практически нет участков, где грунтовые толщи обладают природными защитными свойствами, препятствующими поступлению загрязнения с поверхности, например, в четырех областях (Белгородская, Курская, Орловская и Тамбовская) более 90% территорий характеризуются отсутствием природных защитных свойств.

Исходя из распределения грунтовых толщ на территории ЦФО, целесообразно при оценках риска разделить территорию субъектов округа ( $S_0$ ) на две части  $S_1$  и  $S_2$ , относящиеся к территориям с различной степенью благоприятности инженерно-геологических условий для размещения полигонов захоронения ТКО:

$S_1$  – территории весьма неблагоприятные, неблагоприятные и условно неблагоприятные, которым присвоено 30 баллов;

$S_2$  – условно благоприятные и благоприятные, им присвоено 10 баллов.

Для дальнейших расчетов были просчитаны площади, относящиеся к различной степени благоприятности в соответствии со схемой, разработанной ранее (табл. 1).

Итоговая оценка опасности *по степени благоприятности* отдельных административных субъектов ЦФО определяется по формуле:

$$B_o = \frac{30S_1 + 10S_2}{S_0}.$$

**Таблица 1.** Распределение районов с различной степенью благоприятности инженерно-геологических условий для ЦФО

| № п/п | Наименование субъекта | Площадь субъекта, $S_0$ , тыс. км <sup>2</sup> | Площадь ВН, Н и УН* районов, $S_1$ , тыс. км <sup>2</sup> /% | Площадь УБ, и Б* районов, $S_2$ , тыс. км <sup>2</sup> /% | Суммарные баллы, $B_o$ |
|-------|-----------------------|--|--|---|------------------------|
| 1     | Белгородская          | 27.27  | 26.38/97   | 0.89/3  | 29                     |
| 2     | Брянская              | 34.86  | 31.14/89   | 3.72/11   | 28                     |
| 3     | Владимирская          | 29.08  | 24.84/85   | 4.24/15   | 27                     |
| 4     | Воронежская           | 52.09  | 38.12/73   | 13.97/27  | 25                     |
| 5     | Ивановская            | 21.43  | 15.40/72   | 6.03/28   | 24                     |
| 6     | Калужская             | 29.70  | 23.29/78   | 6.41/22   | 26                     |
| 7     | Костромская           | 60.21  | 50.89/84   | 9.32/16   | 27                     |
| 8     | Курская               | 30.00  | 29.16/97   | 0.84/3  | 29                     |
| 9     | Липецкая              | 23.98  | 14.29/60   | 9.69/40   | 22                     |
| 10    | Московская            | 46.81  | 26.41/56   | 20.40/44  | 21                     |
| 11    | Орловская             | 24.65  | 22.78/95   | 1.87/5  | 28                     |
| 12    | Рязанская             | 39.61  | 30.37/77   | 9.24/23   | 25                     |
| 13    | Смоленская            | 49.22  | 21.30/43   | 27.92/57  | 18                     |
| 14    | Тамбовская            | 34.28  | 32.26/94   | 2.02/6  | 29                     |
| 15    | Тверская              | 84.00  | 27.71/33   | 56.29/67  | 17                     |
| 16    | Тульская              | 25.68  | 10.71/41   | 14.97/59  | 18                     |
| 17    | Ярославская           | 36.20  | 18.1/50  | 18.10/50  | 20                     |

\* ВН – весьма неблагоприятные, Н – неблагоприятные, УН – условно неблагоприятные, УБ – условно благоприятные, Б – благоприятные.

Например, для Белгородской обл. 97% площади отнесены к весьма неблагоприятным, неблагоприятным и условно неблагоприятным и только 3% – к условно благоприятным и благоприятным:  $30 \times 0.97 + 10 \times 0.03 = 29.4$ .

На территории ЦФО расположено порядка 500 различных объектов загрязнения в виде полигонов захоронения, свалок и т.п. В настоящее время существует множество документов СанПиН, СНиП, ФЗ 89 и др., регламентирующих устройство и деятельность санкционированных свалок. Анализ объектов захоронения ТКО на территории ЦФО показал, что большинство из них не отвечают современным нормам организации и эксплуатации полигонов ТКО. Предыдущие исследования также подтверждают тот факт, что в России в подавляющем большинстве случаев такие объекты появлялись стихийно в отработанных карьерах, различных выемках, котлованах – без учета природоохранных требований, планировочных ограничений и технологических решений [1, 15, 18]. В настоящее время многие полигоны не обеспечивают надлежащей изоляции отходов, и загрязняющие вещества продолжают негативно влиять на окружающую среду и социум [19].

Такое положение позволяет при оценках опасности и риска в масштабе 1:2500000 для ЦФО использовать общее количество полигонов, свалок и замусоренных территорий без учета их соответствия санитарным нормам, фазы их существования и без специальных расчетов интенсивности влияния данных объектов на окружающую среду и социум.

Таким образом, существующие объекты опасности данного рода рассматриваются как источники, способные приводить к максимальным негативным последствиям при условии их размещения в пределах территорий с различной степенью благоприятности инженерно-геологических условий для размещения объектов обращения с ТКО. На основе формализации экспертных представлений о том, что наиболее опасными, т.е. приносящими наибольший вред окружающей среде и социуму представляются несанкционированные свалки, им присваивается в пределах территорий  $S_1$ , 30 баллов, полигонам захоронения – 20 баллов, и замусоренным территориям – 10 баллов. Для объектов загрязнения, расположенных в пределах территорий  $S_2$ , несанкционированным свалкам присваивается 3 балла, полигонам захо-

**Таблица 2.** Распределение различных объектов загрязнения в пределах субъектов ЦФО

| № п/п | Наименование субъекта | Количество существующих объектов размещения ТКО в пределах субъекта, ед./% |           |         |                 |          |        | Суммарные баллы, $C_o$ |
|-------|-----------------------|--|-----------|---------|-----------------|----------|--------|------------------------|
|       |                       | $S_1$ , (баллы)  |           |         | $S_2$ , (баллы) |          |        |                        |
|       |                       | НС* (30)   | ПТКО (20) | ЗТ (10) | НС (3)          | ПТКО (2) | ЗТ (1) |                        |
| 1     | Белгородская          | 1/2  | 18/12     | 4/3     | 0               | 0        | 0      | 3.3                    |
| 2     | Брянская              | 6/12   | 17/11     | 5/4     | 1/4             | 0        | 0      | 6.3                    |
| 3     | Владимирская          | 2/4  | 8/5       | 5/4     | 0               | 2/4      | 0      | 2.7                    |
| 4     | Воронежская           | 2/4  | 15/10     | 10/8    | 0               | 0        | 0      | 4.0                    |
| 5     | Ивановская            | 12/24  | 11/7      | 0       | 11/41           | 3/5      | 0      | 10.0                   |
| 6     | Калужская             | 0  | 6/4       | 3/2     | 3/11            | 7/12     | 3/6    | 1.6                    |
| 7     | Костромская           | 1/2  | 6/4       | 0       | 0               | 2/4      | 0      | 1.5                    |
| 8     | Курская               | 1/2  | 6/4       | 14/11   | 0               | 0        | 0      | 2.5                    |
| 9     | Липецкая              | 1/2  | 9/6       | 1/1     | 1/4             | 4/8      | 2/4    | 2.2                    |
| 10    | Московская            | 12/24  | 25/16     | 56/43   | 5/18            | 15/26    | 32/60  | 21.8                   |
| 11    | Орловская             | 0  | 2/1       | 0       | 0               | 0        | 0      | 0.2                    |
| 12    | Рязанская             | 10/20  | 12/8      | 3/2     | 2/7             | 3/5      | 2/4    | 8.2                    |
| 13    | Смоленская            | 0  | 5/3       | 0       | 0               | 10/17    | 0      | 0.9                    |
| 14    | Тамбовская            | 2/4  | 1/0       | 2/2     | 0               | 0        | 0      | 1.4                    |
| 15    | Тверская              | 0  | 2/1       | 15/12   | 0               | 2/4      | 1/2    | 1.5                    |
| 16    | Тульская              | 0  | 2/1       | 4/3     | 1/4             | 2/4      | 7/13   | 0.8                    |
| 17    | Ярославская           | 0  | 11/7      | 7/5     | 3/11            | 6/11     | 8/15   | 2.6                    |

\*НС – несанкционированные свалки, ПТКО – полигоны захоронения ТКО, ЗТ – замусоренные территории.

ронения – 2 балла, и замусоренным территориям – 1 балл (табл. 2).

Итоговая балльная оценка опасности от воздействия объектов загрязнения рассчитывается по формуле:

$$C_o = 30 \frac{N_{НС}}{N_1} + 20 \frac{N_{ПТКО}}{N_2} + 10 \frac{N_{ЗТ}}{N_3} + 3 \frac{N_{НС}}{N_4} + 2 \frac{N_{ПТКО}}{N_5} + 1 \frac{N_{ЗТ}}{N_6},$$

где  $N_{НС}$ ,  $N_{ПТКО}$ ,  $N_{ЗТ}$  – число объектов загрязнения соответствующей категории;  $(N_1 - N_3)$  и  $(N_4 - N_6)$  – число всех объектов загрязнения соответствующей категории соответственно на территориях  $S_1$  и  $S_2$  в пределах ЦФО (см. табл. 2).

Для примера также рассмотрим Белгородскую область. На ее территории в пределах районов  $S_1$  расположена 1 несанкционированная свалка (2%), 18 (12%) полигонов захоронения отходов и 4 (3%) участка замусоренной территории. Источники опасности в пределах территории  $S_2$  отсутствуют:  $30 \times 0.02 + 20 \times 0.12 + 10 \times 0.03 = 3.3$ .

Территория ЦФО подвержена воздействию опасных природных процессов, в основном гидрометеорологического генезиса, приводящих к значительным негативным последствиям, связанным с затоплением и подтоплением территорий, разрушением ветхих сооружений и т.п., с соответствующими экономическими потерями. Прежде всего это сильные ветры, скорость которых достигает 25–30 м/с, сопровождаемые сильными ливневыми дождями, метели и снегопады, а также паводковые явления. В период 1991–2020 гг., согласно разрабатываемой в ИГЭ РАН базе данных о последствиях проявления опасных природных процессов на территории России, количество проявлений перечисленных процессов составило 389 со следующим процентным соотношением: ураганы и ливни – 72%, метели и снегопады – 17%, 8% – паводковые явления (табл. 3). Эти процессы также могут приводить к нештатной ситуации на полигонах захоронения ТКО в результате увеличения вероятности попадания загрязнений в окружающую среду с вытекающими отсюда негативными последствиями. Последствия от гидрометеорологических процессов отнесены к различным категориям по экономиче-

**Таблица 3.** Распределение последствий от проявления опасных гидрометеорологических процессов по субъектам ЦФО

| № п/п | Наименование субъекта | Опасные процессы, ед./%, (баллы) |                        |              | Суммарные баллы, $P_o$ |
|-------|-----------------------|----------------------------------|------------------------|--------------|------------------------|
|       |                       | ураганы, ливни (30)              | метели, снегопады (20) | паводки (10) |                        |
| 1     | Белгородская          | 9/4                              | 0                      | 0            | 1.2                    |
| 2     | Брянская              | 13/5                             | 4/6                    | 6/17         | 4.4                    |
| 3     | Владимирская          | 16/6                             | 18/28                  | 3/8          | 8.2                    |
| 4     | Воронежская           | 23/9                             | 2/3                    | 5/15         | 4.8                    |
| 5     | Ивановская            | 12/5                             | 1/2                    | 1/3          | 2.2                    |
| 6     | Калужская             | 11/4                             | 6/10                   | 2/5          | 3.7                    |
| 7     | Костромская           | 16/6                             | 3/5                    | 4/12         | 3.1                    |
| 8     | Курская               | 10/4                             | 1/2                    | 1/3          | 1.7                    |
| 9     | Липецкая              | 16/6                             | 2/3                    | 1/3          | 2.7                    |
| 10    | Московская            | 29/11                            | 5/7                    | 1/3          | 14.73                  |
| 11    | Орловская             | 13/5                             | 1/2                    | 3/7          | 2.6                    |
| 12    | Рязанская             | 15/6                             | 9/14                   | 1/3          | 4.9                    |
| 13    | Смоленская            | 22/9                             | 2/3                    | 1/3          | 3.6                    |
| 14    | Тамбовская            | 5/2                              | 1/2                    | 3/8          | 1.8                    |
| 15    | Тверская              | 17/7                             | 5/7                    | 2/5          | 4.0                    |
| 16    | Тульская              | 14/5                             | 2/3                    | 2/5          | 2.6                    |
| 17    | Ярославская           | 12/5                             | 0                      | 0            | 1.5                    |

ским и социальным потерям. Умеренная (1) и опасная (2) категории последствий не характеризуются значительными экономическими потерями, но способствуют увеличению поступления загрязняющих веществ с объектов захоронения ТКО в окружающую среду, в результате их затопления, подтопления, переувлажнения и т.п.

Следовательно, для оценок опасности территории предлагается рассматривать общее количество проявлений опасных процессов, способных привести к нештатной ситуации на объектах захоронения ТКО. Исходя из частоты проявления процессов разного генезиса им были присвоены соответствующие баллы: ураганы, ливни – 30, метели, снегопады – 20 и паводки – 10.

Оценка потенциальной опасности по *проявлениям опасных процессов* (гидрометеорологических) субъекта ЦФО вычисляется по формуле:

$$P_o = 30 \frac{N_{ул}}{N_1} + 20 \frac{N_{мс}}{N_2} + 10 \frac{N_n}{N_3},$$

где  $N_{ул}$ ,  $N_{мс}$ ,  $N_n$  – число проявлений процессов, отвечающих определенному генезу,  $N_1$ ,  $N_2$ ,  $N_3$  – соответственно их общее количество в пределах ЦФО (см. табл. 3).

В Белгородской обл. итоговая оценка выглядит следующим образом:  $30 \times 0.04 = 1.2$ .

#### ОЦЕНКА ПРИРОДНО-ТЕХНОГЕННО-СОЦИАЛЬНОГО РИСКА ЦФО

Интегральная оценка опасности характеризует потенциальную возможность негативных последствий от объектов захоронения ТКО в различных их проявлениях на исследуемой территории (табл. 4). Для получения балльной оценки интегральной опасности ( $O_{инт}$ ) были просуммированы балльные значения  $B_o$ ,  $C_o$ ,  $P_o$ , полученные для каждого субъекта ЦФО (см. табл. 1–3).

Интегральная опасность исследуемой территории изменяется от 21.4 (Тульская обл.) до 57.5 балла (Московская обл.). Данный разброс значений было предложено разделить на 5 интервалов, соответствующих различным категориям опасности: 1 – небольшая (<25 баллов), 2 – средняя (25–35), 3 – значительная (35–45), 4 – большая (45–55), 5 – огромная (>55) (см. табл. 4, рис. 1).

Как видим, к территориям с категорией опасности “огромная” относится Московская обл., территорий с категорией опасности “большая” в пределах ЦФО нет. Категория опасности “значительная” присуща Брянской, Владимирской, Ивановской, Рязанской и Тамбовской областям. Наиболее спокойны по степени опасности Белгородская, Воронежская, Калужская, Костромская, Курская, Липецкая и Орловская области (2 “средняя” категория). Смоленская, Тверская, Туль-

**Таблица 4.** Расчетные условные значения риска субъектов ЦФО

| № п/п | Наименование субъекта | Интегральная опасность, $O_{\text{инт}}$ , баллы | Категория опасности | Плотность населения, чел./ км <sup>2</sup> | Условная стоимость балла, $r_i$ | Условное значение риска, $R_i$ | Категория риска |
|-------|-----------------------|--|---------------------|--|---------------------------------|--------------------------------|-----------------|
| 1     | Белгородская          | 33.5   | 2                   | 57.00                                      | 3.4                             | 113.9                          | 3               |
| 2     | Брянская              | 38.7   | 3                   | 34.43                                      | 3.2                             | 123.8                          | 3               |
| 3     | Владимирская          | 37.9   | 3                   | 46.96                                      | 2.8                             | 106.1                          | 3               |
| 4     | Воронежская           | 33.8   | 2                   | 44.58                                      | 2.6                             | 87.9                           | 3               |
| 5     | Ивановская            | 36.2   | 3                   | 46.84                                      | 2.8                             | 101.4                          | 3               |
| 6     | Калужская             | 31.3   | 2                   | 33.90                                      | 2.0                             | 62.6                           | 2               |
| 7     | Костромская           | 31.6   | 2                   | 10.58                                      | 0.6                             | 19.0                           | 1               |
| 8     | Курская               | 33.2   | 2                   | 36.90                                      | 2.2                             | 73.0                           | 2               |
| 9     | Липецкая              | 26.9   | 2                   | 47.57                                      | 2.8                             | 75.3                           | 3               |
| 10    | <b>Московская</b>     | <b>57.5</b>                                      | <b>5</b>            | <b>169.00</b>                              | <b>10</b>                       | <b>575</b>                     | <b>5</b>        |
| 11    | Орловская             | 30.8   | 2                   | 30.00                                      | 1.8                             | 55.4                           | 2               |
| 12    | Рязанская             | 38.1   | 3                   | 28.13                                      | 1.7                             | 64.8                           | 2               |
| 13    | Смоленская            | 22.5   | 1                   | 18.93                                      | 1.1                             | 24.7                           | 1               |
| 14    | Тамбовская            | 32.2   | 3                   | 29.48                                      | 1.7                             | 54.7                           | 2               |
| 15    | Тверская              | 22.5   | 1                   | 15.08                                      | 0.9                             | 20.3                           | 1               |
| 16    | Тульская              | 21.4   | 1                   | 57.59                                      | 3.4                             | 72.8                           | 2               |
| 17    | Ярославская           | 24.1   | 1                   | 34.82                                      | 2.1                             | 50.6                           | 2               |

ская и Ярославская области являются наиболее благоприятными и соответствуют 1 категории “небольшой” опасности.

Формирование и оценка природно-техногенно-социального риска исследуемой территории обусловлены взаимосвязями источника опасности и реципиента. В данном случае источник опасности – это совокупность первых трех факторов информационного уровня формирования риска, представленных выше, и выраженная через сумму баллов ( $O_{\text{инт}}$ ), присвоенных каждому фактору (природно-техногенная составляющая), а реципиент – население (социальная составляющая).

Если исходить из общих методологических подходов к оценке риска, основанной на стоимостной оценке балла, рассчитываемой из среднесредних потерь от опасностей определенного генезиса на определенной площади, то *условная стоимость балла может быть принята для каждого административного района с учетом плотности населения*. Плотность населения рассматриваем как основной индикатор, характеризующий освоенность, а соответственно и техногенную нагруженность территории, т.е. как основной реципиент, обобщающий в косвенном виде возможные негативные последствия от ин-

тегральной опасности территории. Совершенно очевидно, что чем больше плотность населения, тем больше вероятность негативных последствий от источников загрязнения на окружающую среду и социум при прочих равных условиях. Такой подход к оценке риска территорий от различных источников загрязнения ТКО осуществляется впервые.

Если принять условную стоимость 1 балла в пределах территорий с максимальной плотностью населения (Московская обл., 169 чел./км<sup>2</sup>) за некоторое количество условных единиц ( $r$ ), то стоимость 1 балла в пределах других районов ( $r_i$ ) можно рассчитать по формуле:

$$r_i = r \frac{A_i}{A_m},$$

где  $A_i$ ,  $A_m$  – плотность населения в каждом административном субъекте и максимальная плотность населения (Московская обл.) соответственно.

Принимая условие, что 1 балл опасности в пределах Московской обл. имеет условную стоимость в 10 единиц, то стоимость балла в остальных субъектах ЦФО соответственно имеет значения, указанные в табл. 4.



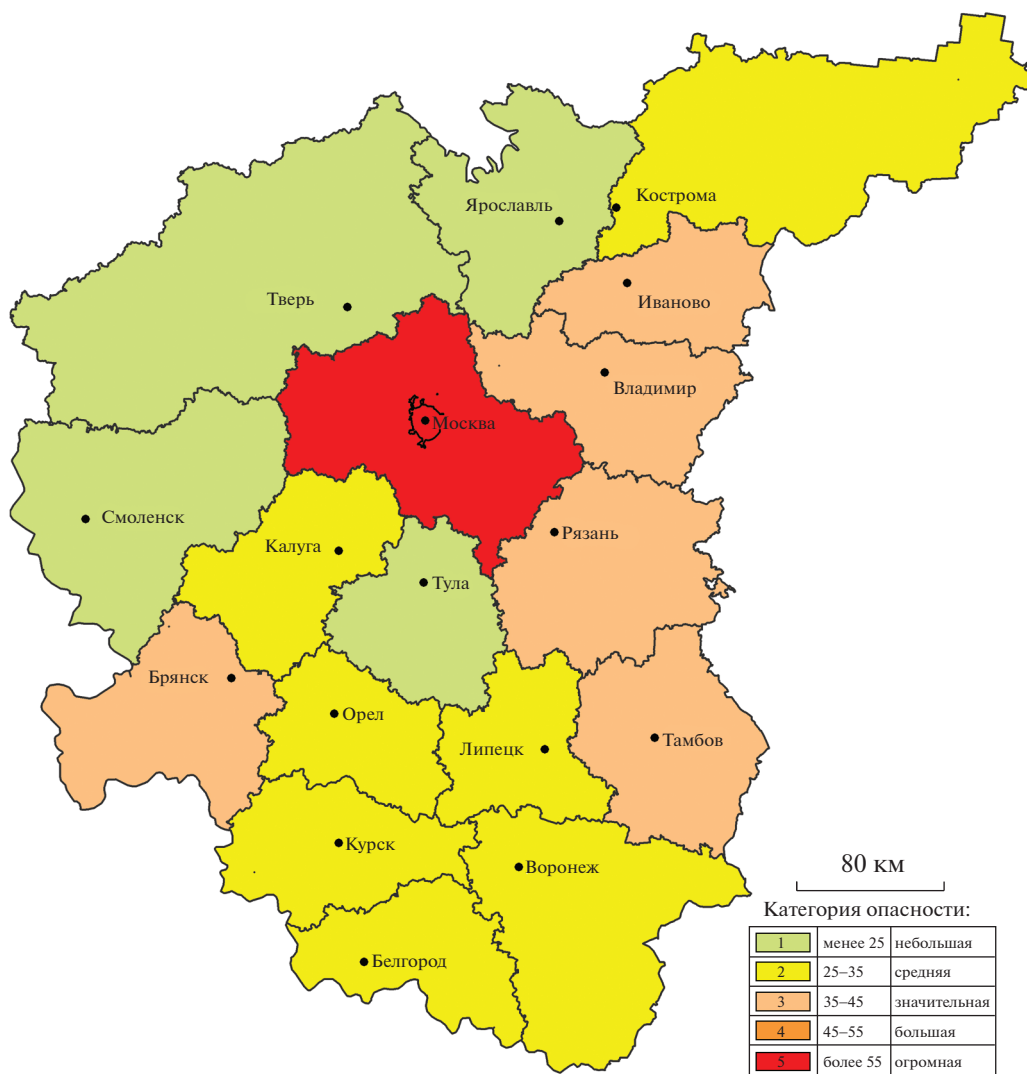


Рис. 1. Карта-схема природно-техногенной опасности ЦФО.

Соответственно оценку условного природно-техногенно-социального риска для каждой из областей получаем из выражения:

$$R_i = r_i \times O_{\text{инт}}$$

Интервал полученных условных значений риска изменяется от 19 баллов (Костромская обл.) до 575, который правомерно разделить на 5 категорий риска аналогично выделенным категориям опасности территорий: 1 – небольшой (<25); 2 – средний (25–75); 3 – значительный (75–150); 4 – большой (150–300); 5 – огромный (>300).

Полученные расчетные данные природно-техногенно-социального риска субъектов ЦФО отражены на карте-схеме (рис. 2). Как видим, наибольший риск (огромный – 5 категория), как и интегральная опасность (5), характерны для Московской обл. Категория большого риска (4) и большой опасности (4) на территории ЦФО от-

сутствует. Сохранилось соответствие значительной категории опасности и риска и для Брянской, Владимирской и Ивановской областей; средней категории опасности и риска (2) – для Калужской, Курской и Орловской областей; а небольшая категория опасности и риска (1) – для Смоленской и Тверской.

В остальных областях картина выглядит иначе. В Белгородской, Воронежской и Липецкой областях категории риска выше, чем категории интегральной опасности – категория опасности соответствует средней (2), а категория риска – значительной (3). В Тульской и Ярославской областях категория опасности небольшая (1), категория риска – средняя (2).

В Рязанской и Тамбовской произошло уменьшение категории риска по отношению к категории опасности от значительной (3) до средней (2),

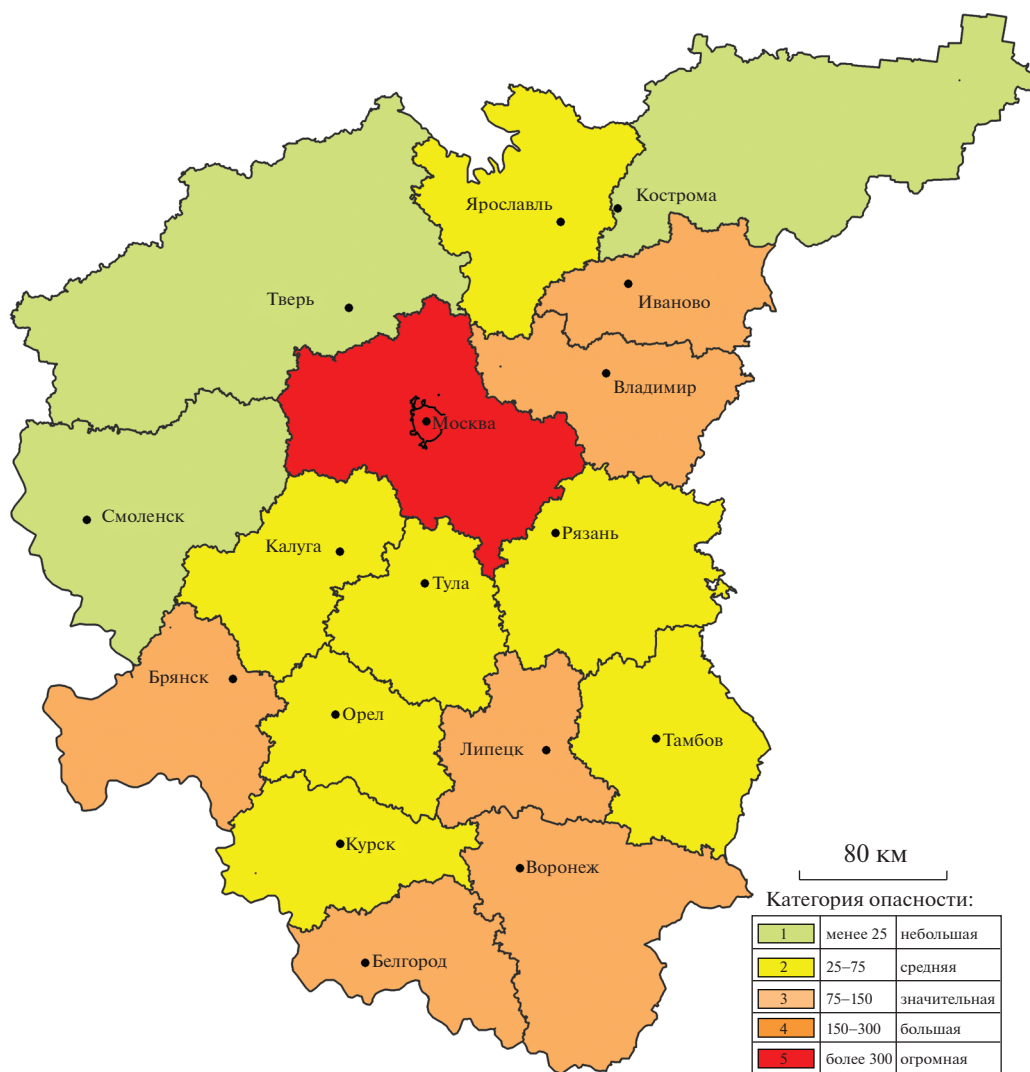


Рис. 2. Карта-схема природно-техногенно-социального риска ЦФО.

а в Костромской обл. – от средней категории опасности (2) до небольшой категории риска (1).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненная **сравнительная качественная оценка геологического риска** как величины вероятного экономического и социального ущерба от негативного воздействия объектов ТКО на геологическую среду для каждой из 17 областей на основании таких критериев, как доля неблагоприятных районов от общей площади территории области; число объектов ТКО, расположенных в этих районах; плотность населения и инфраструктурная нагрузка, представляют несомненную ценность. Такая экологическая оценка носит обзорный характер и предназначена для органов федерального управления, планирующих инвестиции в решение проблемы утилизации и захо-

ронения отходов в России. Она позволяет определить приоритетные направления финансовых вложений.

Возможно, какие-то полигоны могут быть реконструированы в соответствии с современными требованиями экологической безопасности. В то же время геологическая среда отдельных районов может быть настолько загрязнена в результате бесконтрольного использования под складирование ТКО, что потребуются специальные ограничения на ее использование даже после закрытия и рекультивации полигона или свалки. Необходимо установление ограничений на использование и расширение существующих объектов ТКО, расположенных в неблагоприятных по геологическим критериям районах. Требуется разработка технологии рекультивации полигонов и свалок, расположенных на неблагоприятных территориях.

При этом предложенный метод оценки интегральной опасности и риска дает не только представление о текущей ситуации на исследуемых территориях, но и позволяет определять последствия изменения некоторых факторов риска. А именно, к каким последствиям может привести изменение таких составляющих, как тип, количество и расположение источников загрязнения, а также изменение количества жителей в регионе.

Предложенный подход может быть использован при оценках риска для более крупных масштабов исследования, но с соответствующим увеличением количества факторов и информационного пространства.

*Авторы благодарят старшего научного сотрудника лаборатории экзогенной геодинамики и анализа геологического риска ИГЭ РАН И.А. Кожевникова за помощь в подготовке картографического материала.*

*Статья подготовлена в рамках выполнения государственного задания ИГЭ РАН по теме НИР № г.р. 122022400104-2 “Техногенез и природа: геоэкологические проблемы” и частично в рамках проекта РНФ 22-17-00045 “Научное обоснование безопасного захоронения ТКО в геологической среде”.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абросимов А.В.* Использование космических снимков и геоинформационных технологий для мониторинга мест складирования отходов // *Экология урбанизированных территорий.* 2014. № 1. С. 38–43.
2. *Алешина Т.А., Чернышев С.Н.* Современное геоэкологическое состояние свалок и полигонов твердых бытовых отходов Московской области и пути решения // *Вестник МГСУ.* 2012. № 9. С. 185–190.
3. *Блинов Л.Н., Букреев В.В., Ложечко В.П.* Большой город. Экология, безопасность жизнедеятельности. СПб: Изд-во Политехнического университета. 2014. 405 с.
4. *Заиканов В.Г., Заиканова И.Н., Булдакова Е.В.* Геоэкологический и ландшафтно-экологический анализ территорий существующих свалок ТБО Московской области // *Сергеевские чтения.* Вып. 20. М.: РУДН, 2018. С. 65–73.
5. *Ильиных Г.В., Коротаев В.Н., Вайсман Я.И.* Алгоритм оценки экологической нагрузки на объекты окружающей среды при обращении с твердыми бытовыми отходами с учетом их состава и свойств // *Вестник МГСУ.* 2014. № 2. С. 131–139.
6. *Козлякова И.В., Кожевникова И.А., Анисимова Н.Г., Еремина О.Н.* Геоэкологические аспекты проблемы размещения твердых коммунальных отходов (на примере Центральной России) // *Сергеевские чтения.* Вып. 22. М.: РУДН, 2020. С. 129–132.
7. *Козлякова И.В., Кожевникова И.А., Еремина О.Н., Анисимова Н.Г.* Методологические принципы оценки геологической среды для размещения объектов обращения с ТКО // *Геоэкология.* 2021. № 1. С. 48–58. <https://doi.org/10.31857/S0869780921010045>
8. *Малышевский А.Ф., Хабиров В.В.* Обоснование выбора оптимального способа обезвреживания твердых бытовых отходов в городах России. М.: ИФЗ РАН, 2012. 42 с.
9. *Мочалова Л.А., Гриценко Д.А., Юрак В.В.* Система обращения с твердыми коммунальными отходами: зарубежный и отечественный опыт // *Известия УГГУ.* 2017. Вып. 3 (47). С. 97–101.
10. *Музалевский А.А., Федоров М.П., Сергеев В.В.* Оценка экологических рисков в природно-технических системах, образованных полигонами твердых бытовых отходов // *Экологическая безопасность строительства и городского хозяйства.* 2020. № 1. С. 28–34. <https://doi.org/10.24411/1816-1863-2020-11028>
11. *Музалевский А.А., Федоров М.П., Сергеев В.В.* Риск-анализ модели полигонов твердых бытовых отходов вокруг Санкт-Петербурга // *Геоэкология.* 2019. № 3. С. 22–27. <https://doi.org/10.24411/1816-1863-2019-13022>
12. *Осипов В.И.* Управление твердыми коммунальными отходами как федеральный экологический проект // *Геоэкология.* 2019. № 3. С. 3–11.
13. *Осипов В.И., Аникеев А.В., Бурова В.Н. и др.* Геологический риск урбанизированных территорий / Под ред. В.И. Осипова. М.: РУДН, 2020. 312 с.
14. *Осипов В.И., Мамаев Ю.А., Козлякова И.В.* Территориальное размещение полигонов твердых коммунальных отходов // *Вестник РАН.* 2020. Т. 90. № 6. С. 567–574. <https://doi.org/10.1134/S101933162002015X>
15. *Погорелов А.В., Липилин Д.А.* Мониторинг и классификация свалок на территории Краснодарского края // *Известия Дагестанского государственного педагогического университета.* 2014. № 1 (26). С. 114–121.
16. *Саати Т.* Принятие решений. Метод анализа иерархий. Пер. с англ. М.: Радио и связь, 1993. 278 с.
17. *Слюсарь Н.Н.* Использование результатов оценки экологического риска для разработки программ вывода из эксплуатации старых свалок // *Вестник МГСУ.* 2016. № 8. С. 88–99.
18. *Тимофеева С.С., Шешукова Л.В., Охотин А.Л.* Мониторинг свалок твердых бытовых и промышленных отходов в Иркутском районе по данным космических снимков // *Вестник ИрГТУ.* 2012. № 9. С. 76–81.
19. *Титова А.Г.* Оценка влияния полигона твердых коммунальных отходов на окружающую среду с использованием междисциплинарного подхода // *Проблемы региональной экологии.* 2019. № 2. С. 53–58. <https://doi.org/10.24411/1728-323X-2019-12053>
20. *Юганова Т.И.* Выбор участков для размещения объектов обращения с отходами на основе методов многокритериального принятия решений // *Геоэкология.* 2019. № 4. С. 79–93. <https://doi.org/10.31857/S0869-78092019479-93>

21. *Balogun-Adeleye R.M., Longe E.O., Aiyesimoju K.O.* Environmental assessment of municipal solid waste (MSW) disposal options: A case study of Olushosun landfill. Lagos State // 1st Int. Conf. on Sustainable Infrastructural Development. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2019. Paper 640. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/640/1/012091>
22. *Bottero M., Ferretti V.* An Analytic Network Process-based approach for location problems: The case of a new waste incinerator plant in the Province of Torino (Italy) // J. of Multi-Criteria Decision Analysis. 2011. V. 17. № 3–4. P. 63–84.
23. *Chauhan A., Singh A.* A hybrid multi-criteria decision making method approach for selecting a sustainable location of healthcare waste disposal facility // J. of Cleaner Production. 2016. № 139. P. 1001–1010. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.08.098>
24. *Cremiato R., Mastellone M.L., Tagliaferri C., Zaccariello L., Lettieri P.* Environmental impact of municipal solid waste management using life cycle assessment: the effect of anaerobic digestion, materials recovery and secondary fuels production // Renewable Energy, Elsevier, 2018. V. 124 (C). P. 180–188. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.06.033>
25. *Djokanović S., Abolmasov B., Jevremović D.* GIS application for landfill site selection: a case study in Pančevo. Serbia // Bull. Eng. Geol. Environ., 2016. V. 75. № 3. P. 1273–1299. <https://doi.org/10.1007/s10064-016-0888-0>
26. *Erkut E., Karagiannidis A. et al.* A multicriteria facility location model for municipal solid waste management in North Greece // European Journal of Operational Research. 2008. № 187. P. 1402–1421.
27. *Guler D., Yomralioglu T.* Alternative suitable landfill site selection using analytic hierarchy process and geographic information systems: a case study in Istanbul // Environmental Earth Sciences, October 2017. 76: 678. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-7039-1>
28. *Khodaparast M., Rajabi Ali M., Edalat Ali.* Municipal solid waste landfill siting by using GIS and analytical hierarchy process (AHP): a case study in Qom city, Iran // Environmental Earth Sciences. January 2018. № 77. P. 52. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-7215-3>
29. *Nakhaei M., Amiri V., Rezaei K., Moosae F.* An investigation of the potential environmental contamination from the leachate of the Rasht waste disposal site in Iran // Bull. Eng. Geol. Environ. 2015. № 74. P. 233–246. <https://doi.org/10.1007/s10064-014-0577-9>
30. *Phukon P., Phukan S., Goswami R.* Municipal Solid Waste (MSW) disposal site selection in and around Guwahati city using GIS. Map India 2005. <https://www.researchgate.net/publication/228456456>
31. *Rahmat Z.G., Niri M.V., Alavi N. et al.* Landfill site selection using GIS and AHP: a case study: Behbahan, Iran // KSCE Journal of Civil Engineering. January. 2017. V. 21. Is. 1. P. 111–118. <https://doi.org/10.1007/s12205-016-0296-9>
32. *Schueler A.S., Mahler C.F.* Classification Method for Urban Solid Waste Disposal Sites // Journal of Environmental Protection. 2011. № 2. P. 473–481. <https://doi.org/10.4236/jep.2011.24055>
33. *Wang G., Qin L., Li G., Chen L.* Landfill site selection using spatial information technologies and AHP: A case study in Beijing. China // J. Environ Manage. 2009. V. 90. № 8. P. 2414–2421. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2008.12.008>
34. *Zelenović Vasiljević T., Srdjević Z., Bajčetić R. et al.* GIS and the Analytic Hierarchy Process for Regional Landfill Site Selection in Transitional Countries: A Case Study From Serbia // Environmental Management. February 2012. V. 49. Is. 2. P. 445–458. <https://doi.org/10.1007/s00267-011-9792-3>

## PROBLEMS IN MUNICIPAL SOLID WASTE DISPOSAL AND RISK ASSESSMENT BY THE EXAMPLE OF THE CENTRAL FEDERAL REGION, RUSSIA

**V. N. Burova<sup>a,#</sup>, I. V. Kozlyakova<sup>a,##</sup>, and O. N. Eremina<sup>a</sup>**

<sup>a</sup>*Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences,  
Ulanskii per., 13, str.2, Moscow, 101000 Russia*

<sup>#</sup>*E-mail: valentina\_burova@mail.ru*

<sup>##</sup>*E-mail: ivk.geoenv@yandex.ru*

The analysis of Russian and foreign scientific studies aimed at solving problem of safe municipal solid waste (MSW) disposal proves that little attention is paid to the preliminary risk assessment in the territories in respect to MSW disposal. The article discusses the methodical principles of assessing the integral natural-technogenic hazard and risk for the territories of administrative divisions in the Central Federal region of Russia produced by legal and illegal landfills located there. For the purpose of this study, the chosen risk-forming factors include both natural, technogenic, and social components, i.e. geological structure of the soil and rock massif, natural (hydrometeorological) hazards, the number of landfills in the given administrative district, and the population density. The comparative qualitative characteristics of geological risk as the value of the probable economic and social damage caused by the disastrous impact of MSW on the geoenvironment is calculated is scores for each of 17 administrative districts of the Central Federal region. This prelimi-

nary overview assessment is intended for federal authorities planning investments in solving MSW problem in Russia.

**Keywords:** municipal solid waste disposal, MSW landfills, assessment of natural-technogenic hazard, geological risk, geological structure of massif, natural hazards, Central Federal region of Russia

## REFERENCES

- Abrosimov, A.V. *Ispol'zovanie kosmicheskikh snimkov i geoinformatsionnykh tekhnologii dlya monitoringa mest skladirovaniya otkhodov* [Use of satellite images and GIS technologies for monitoring waste disposal sites]. *Ekologiya urbanizirovannykh territorii*, 2014, no. 1, pp. 38–43. (in Russian)
- Aleshina, T.A., Chernyshov, S.N. *Sovremennoe geoeologicheskoe sostoyanie svalok i poligonov tverdykh bytovykh otkhodov Moskovskoi oblasti i puti resheniya* [Current geoeological status of landfills and municipal solid waste disposal sites in the Moscow region and possible solutions of the problem]. *Vestnik MGSU*, 2012, no. 9, pp. 185–190. (in Russian)
- Blinov, L.N., Bukreev, V.V., Lozhechko, V.P. *Bol'shoy gorod. Ekologiya, bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti* [A large city. Ecology and life safety]. St. Petersburg, Polytechnic University Publ., 2014, 405 p. (in Russian)
- Zaikanov, V.G., Zaikanova, I.N., Buldakova, E.V. *Geoekologicheskii i landshaftno-ekologicheskii analiz syshchestvuyushchikh svalok TBO Moskovskoi oblasti* [Geoeological and landscape ecological analysis of landfill sites in Moscow oblast]. *Sergeevskie chteniya*, issue 20. Proc. of the Sci. Conference, March 22, 2018, Moscow, RUDN Publ., 2018, pp. 65–73. (in Russian)
- Il'inykh, G.V., Korotaev, V.N., Vaisman, Ya.I. *Algoritm otsenki ekologicheskoi nagruzki na ob'ekty okruzhayushchei sredy pri obrashchenii s tverdymi bytovymi otkhodami s uchetom ikh sostava i svoystv* [Algorithm for assessing ecological load on the environment bodies upon processing municipal solid waste taking into account their composition and properties]. *Vestnik MGSU*, 2014, no. 2, pp. 131–139. (in Russian)
- Kozliakova, I.V., Kozhevnikova, I.A., Anisimova, N.G., Eremina O.N. *Geoekologicheskii aspekt problem razmeshcheniya tverdykh kommunal'nykh otkhodov (na primere Tsentral'noi Rossii)* [Geoeological aspects of the municipal solid waste disposal (by the example of the Central Russia region)]. *Sergeevskie chteniya*, issue 22, Moscow, RUDN Publ., 2020, pp. 129–132 (in Russian).
- Kozliakova, I.V., Kozhevnikova, I.A., Eremina, O.N., Anisimova, N.G., *Metodologicheskie printsipy otsenki geologicheskoi sredy dlya razmeshcheniya ob'ektov obrashcheiya s TKO* [Methodological principles of assessing geoenvironment for allocation of municipal solid waste management facilities]. *Geoekologiya*, 2021, no. 1, pp. 48–58. <https://doi.org/10.31857/S0869780921010045>. (in Russian)
- Malyshevskii, A.F., Khabirov, V.V. *Obosnovanie vybora optimal'nogo sposoba obezvezhivaniya tverdykh bytovykh otkhodov v gorodakh Rossii* [Substantiation of choosing the optimal method for neutralization of municipal solid waste in the Russian cities]. Moscow, IFZ RAN Publ., 2012, 42 p. (in Russian)
- Mochalova, L.A., Gritsenko, D.A., Yurak, V.V. *Sistema obrashcheniya s tverdymi kommunal'nymi otkhodami: zarubezhnyi i otechestvennyi opyt* [Processing municipal solid waste: domestic and foreign experience]. *Izvestiya UGGU*, 2017, no. 3 (47), pp. 97–101. (in Russian)
- Muzalevskii, A.A., Fedorov, M.P., Sergeev, V.V. *Otsenka ekologicheskikh riskov v prirodno-tekhnicheskikh sistemakh, obrazovannykh poligonami tverdykh bytovykh otkhodov* [Assessment of ecological risks in natural-technogenic systems formed of municipal solid waste disposal sites]. *Ekologicheskaya bezopasnost' stroitel'stva i gorodskogo khozyaistva*. 2020, no. 1, pp. 28–34. <https://doi.org/10.24411/1816-1863-2020-11028> (in Russian)
- Muzalevskii, A.A., Fedorov, M.P., Sergeev, V.V. *Risk-analiz modeli poligonov tverdykh bytovykh otkhodov vokrug Sankt-Peterburga* [Risk analysis of MSW landfill model near St. Petersburg]. *Geoekologiya*, 2019, no. 3, pp. 22–27. <https://doi.org/10.24411/1816-1863-2019-13022> (in Russian)
- Osipov, V.I. *Upravlenie tverdymi kommunal'nymi otkhodami kak federal'nyi ekologicheskii projekt* [Management of municipal solid wastes as a Federal ecological project]. *Geoekologiya*, 2019, no. 3, pp. 3–11. (in Russian)
- Osipov, V.I., Anikeev, A.V., Burova, V.N., et al. *Geologicheskii risk urbanizirovannykh territorii* [Geological risk in urban areas]. Osipov, V.I., Ed., Moscow, RUDN Publ., 2020, 312 p. (in Russian)
- Osipov, V.I., Mamaev, Yu.A., Kozliakova, I.V. *Territorial placement of solid municipal waste landfills. Herald of the Russian Academy of Sciences*, 2020, vol. 90, no. 3, pp. 338–344. <https://doi.org/10.1134/S101933162002015X>
- Pogorelov, A.V., Lipilin D.A. *Monitoring i klassifikatsiya svalok na territorii Krasnodarskogo kraia* [Monitoring and classification of landfills in Krasnodar region]. *Izvestiya DGU*, 2014, no. 1 (26), pp. 114–121. (in Russian)
- Saati, T. *Prinyatie reshenii. Metod analiza ierarkhii* [Decision making. Method of hierarchy analysis]. Translated from English. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1993, 278 p. (in Russian)
- Slyusar', N.N. *Ispol'zovanie rezul'tatov otsenki ekologicheskogo risks dlya razrabotki program vyvoda iz ekspluatatsii starykh svalok* [The use of ecological risk assessment results for developing programs of old landfill closure]. *Vestnik MGSU*, 2016, no. 8, pp. 88–99. (in Russian)
- Timofeeva, S.S., Sheshukova, L.V., Okhotin, A.L. *Monitoring svalok tverdykh bytovykh i promyshlennykh otkhodov v Irkutskom raione po dannym kosmicheskikh snimkov* [Monitoring old municipal and industrial solid waste landfills in Irkutsk region by the satellite image

- data]. *Vestnik IrGTU*, 2012, no. 9, pp.76–81. (in Russian)
19. Titova, A.G. *Otsenka vliyaniya poligona tverdykh kommunal'nykh otkhodov na okruzhayushchuyu sredy s ispol'zovaniem mezhdistsiplinarnogo podkhoda* [Assessment of MSW landfills impact on the environment using the interdisciplinary approach]. *Problemy regional'noi ekologii*, 2019, no. 2, pp. 53–58. <https://doi.org/10.24411/1728-323X-2019-12053> (in Russian)
  20. Yuganova, T.I. *Vybor uchastkov dlya razmesheniya ob'ektov obrashcheniya s otkhodami na osnove metodov mnogokriterial'nogo prinyatiya reshenii* [Selection of sites for allocation of waste disposal objects based on the multicriteria decision-making methods] *Geoekologiya*, 2019, no. 4, pp. 79–93. <https://doi.org/10.31857/S0869-78092019479-93> (in Russian)
  21. Balogun-Adeleye, R.M., Longe, E.O., Aiyesimoju, K.O. Environmental assessment of municipal solid waste (MSW) disposal options: A case study of Olushosun landfill, Lagos State// 1st International Conference on Sustainable Infrastructural Development. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 2019, paper no. 640. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/640/1/012091>
  22. Bottero, M., Ferretti, V. An Analytic Network Process-based approach for location problems: The case of a new waste incinerator plant in the Province of Torino (Italy). *J. of Multi-Criteria Decision Analysis*, 2011, vol. 17, nos. 3–4, pp. 63–84.
  23. Chauhan, A., Singh, A. A hybrid multi-criteria decision making method approach for selecting a sustainable location of healthcare waste disposal facility. *Journal of Cleaner Production*, 2016, no. 139, pp. 1001–1010. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.08.098>
  24. Cremiato, R., Mastellone, M.L., Tagliaferri, C., Zaccariello, L., Lettieri, P. Environmental impact of municipal solid waste management using life cycle assessment: the effect of anaerobic digestion, materials recovery and secondary fuels production. *Renewable Energy*, 2018, vol. 124 (C), pp. 180–188. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.06.033>
  25. Djokanović, S., Abolmasov, B., Jevremović, D. GIS application for landfill site selection: a case study in Pančevo, Serbia. *Bull. Eng. Geol. Environ.*, 2016, vol. 75, no. 3, pp. 1273–1299. <https://doi.org/10.1007/s10064-016-0888-0>
  26. Erkut, E., Karagiannidis, A. et al. A multicriteria facility location model for municipal solid waste management in North Greece. *European Journal of Operational Research*, 2008, no. 187, pp. 1402–1421.
  27. Guler, D., Yomralioglu, T. Alternative suitable landfill site selection using analytic hierarchy process and geographic information systems: a case study in Istanbul. *Environmental Earth Sciences*, October 2017, no. 76, p. 678. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-7039-1>
  28. Khodaparast, M., Rajabi, Ali M., Edalat, Ali. Municipal solid waste landfill siting by using GIS and analytical hierarchy process (AHP): a case study in Qom city, Iran. *Environmental Earth Sciences*, January 2018, no. 77, p. 52. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-7215-3>
  29. Nakhaei, M., Amiri, V., Rezaei, K., Moosae, F. An investigation of the potential environmental contamination from the leachate of the Rasht waste disposal site in Iran. *Bull. Eng. Geol. Environ.*, 2015, no. 74, pp. 233–246. <https://doi.org/10.1007/s10064-014-0577-9>
  30. Phukon, P., Phukan, S., Goswami, R. Municipal Solid Waste (MSW) disposal site selection in and around Guwahati city using GIS, Map India 2005. <https://www.researchgate.net/publication/228456456>
  31. Rahmat, Z.G., Niri, M.V., Alavi, N. et al. Landfill site selection using GIS and AHP: a case study: Behbahan, Iran. *KSCE Journal of Civil Engineering*, January 2017, vol. 21, no. 1, pp. 111–118. <https://doi.org/10.1007/s12205-016-0296-9>
  32. Schueler, A.S., Mahler, C.F. Classification method for urban solid waste disposal sites. *Journal of Environmental Protection*, 2011, no. 2, pp. 473–481. <https://doi.org/10.4236/jep.2011.24055>
  33. Wang, G., Qin, L., Li, G., Chen, L. Landfill site selection using spatial information technologies and AHP: A case study in Beijing, China. *J. Environ. Manage.*, 2009, vol. 90, no. 8, pp. 2414–2421. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2008.12.008>
  34. Zelenović Vasiljević, T., Srdjević, Z., Bajčetić, R. et al. GIS and the analytic hierarchy process for regional landfill site selection in transitional countries: a case study from Serbia. *Environmental Management*, February 2012, vol. 49, no. 2, pp. 445–458. <https://doi.org/10.1007/s00267-011-9792-3>

---

---

**ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОПРИРОДНЫЕ  
ПРОЦЕССЫ**

---

---

УДК 551.24

**ПАЛЕОСЕЙСМИЧНОСТЬ ЮЖНОГО ПРИИССЫККУЛЬЯ  
И ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ КАДЖИ-САЙСКОГО УРАНОВОГО  
ХВОСТОХРАНИЛИЩА (КЫРГЫЗСКАЯ РЕСПУБЛИКА)**© 2022 г. Л. А. Корженкова<sup>1,\*</sup>, А. М. Корженков<sup>2</sup>, В. М. Макеев<sup>1,\*\*</sup><sup>1</sup> *Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева Российской академии наук,  
Уланский пер., 13, стр. 2, Москва, 101000 Россия*<sup>2</sup> *Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта,  
Б. Грузинская ул., 10, стр. 1, Москва, 123242 Россия*

\*E-mail: korjenkova2404@mail.ru

\*\*E-mail: vmakeev@mail.ru

Поступила в редакцию 14.10.2022 г.

После доработки 17.10.2022 г.

Принята к публикации 20.10.2022 г.

Исследование направлено на изучение редкой и сильной палеосейсмичности Южного Прииссыккулья методами палео- и археосейсмологии. В средневековье этот регион находился под неоднократным воздействием землетрясений, которые могли приводить к катастрофическим последствиям – разрушению средневековых цивилизаций. Подобные негативные процессы не исключены и в настоящее время. Регион исследований включает южные прибрежные зоны оз. Иссык-Куль с их промышленной, селитебной, хозяйственной и др. инфраструктурой. Палеосейсмологические исследования в Южном Прииссыккулье позволили впервые выявить выходы очагов сильных древних землетрясений – сейсмоуступов, в непосредственной близости от Каджисайского хвостохранилища. В плейстосейстовых ареалах землетрясений выявлены значительные скальные обрушения: обвалы, срывы и оползни. На основе радиоуглеродного датирования образцов определены возрасты этих сейсмических событий. Установлена их повторяемость – раз в несколько сотен лет, магнитуда  $M_s \geq 7$  и сейсмическая интенсивность  $I_0 \geq IX$  баллов. Структурная позиция землетрясений, очаги которых локализируются в верхней части земной коры, связывается с неотектоническими и современными зонами дислокаций. Ими являются глубинные взбросо-надвиги с южным падением и предгорные поднятия-адыры взбросового типа с северным. Последние локализованы во фронтальной части крупных поднятий, надвигающихся на прогибы. Образование этих зон со встречным типом развития связывается с субгоризонтальным сокращением земной коры Тянь-Шаня и ее орогенезом. Вещественно-структурные процессы приводят к перераспределению мощности земной коры и формированию высоких гор. По причине встречных деформаций в разломах происходит концентрация напряжений и деформаций – формирование потенциальных очагов сейсмичности, в т.ч. катастрофического характера. Территория Каджи-Сайского уранового хвостохранилища подвергается угрозе разрушения по причине сейсмической опасности и вторичных интенсивных экзогенных процессов – оползней и селей. Землетрясения, как правило, вызывают оползание полускальных неогеновых пород иссык-кульской свиты, на которых залегают радиоактивные отходы. Установлено, что атмосферные воды, размывающие хвостохранилище, текут не только в селеуловитель, но и мимо него – в направлении оз. Иссык-Куль. Вода, накопившаяся за природными дамбами на склонах хребтов, может прорвать удерживающие их препятствия и превратиться в мощный грязекаменный селевой поток. Существующие селеуловители по объемам и местоположению ныне не отвечают существующей угрозе. Для организации инженерной защиты площадок размещения радиоактивных отходов от негативных процессов предлагается провести дополнительные уточняющие исследования, связанные с оценкой сейсмической, оползневой и селевой опасности.

**Ключевые слова:** палеосейсмология, археосейсмология, разломы, сейсмоуступы, обвалы, осыпи, скальные оползни, урановое хвостохранилище, торткули, адыры, караван-сарай

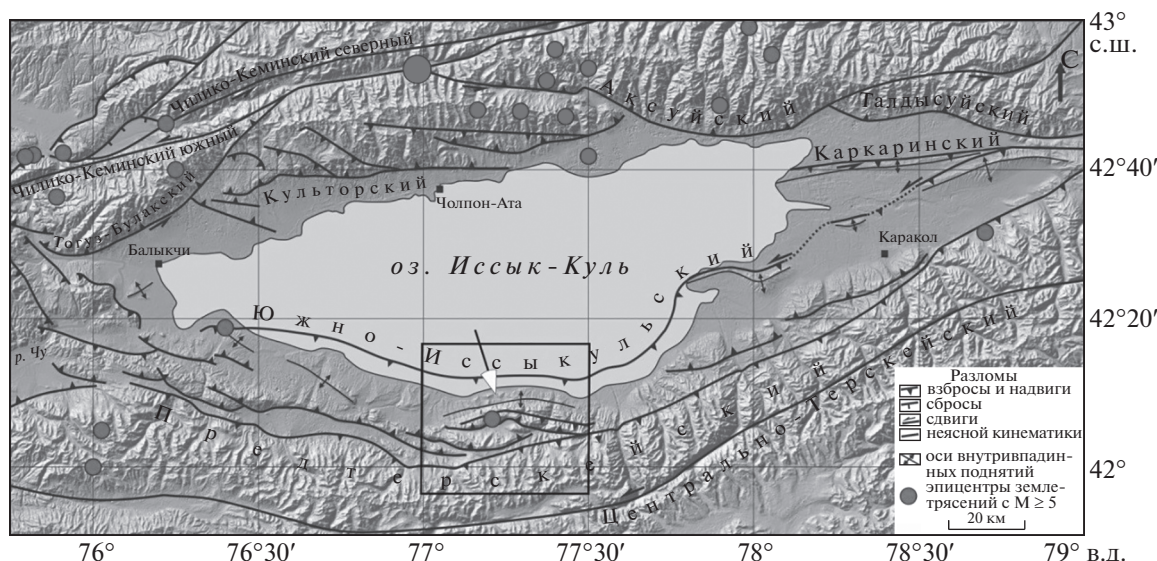
DOI: 10.31857/S0869780922060054

**ВВЕДЕНИЕ**

Регион исследования находится в горной Иссык-Кульской области Кыргызской Респуб-

лики (Южное Прииссыккулье) (рис. 1), которая характеризуется высокой сейсмической активностью [5, 9].





**Рис. 1.** Неотектонические структуры Прииссыккуля. Рельеф создан с использованием программного пакета GeoMapApp (<http://www.geomapapp.org>). Прямоугольник – район детальных исследований. Стрелка указывает на площадку Каджи-Сайского уранового хвостохранилища.

Горы этой страны – высококонтрастные, созданы относительно медленными дифференцированными неотектоническими движениями. Но наибольшую опасность вызывают непредсказуемые разрушительные сейсмогенные дислокации. Они сопровождаются образованием сейсмодислокаций: уступов, обвалов, оползней, селей и проч. Подобного рода сейсмогенные процессы могут угрожать району расположения Каджи-Сайского радиоактивного хвостохранилища, которое осталось после закрытия шахты по добыче урана.

В рассматриваемом регионе широко распространены позднепалеозойские отложения, смятые в складки и нарушенные разрывами. Отложения прорваны интрузивными позднепалеозойскими массивами кварцевых порфиров, фельзитов ( $D_3-C_1$ ) и ордовикских гранитов. С угловым и стратиграфическим несогласием складчато-разрывные отложения перекрываются красноцветными субплатформенными олигоцен-миоценовыми отложениями, залегающими на эпигерцинской древней денудационной поверхности. В мезозое Южное Прииссыккулье было частью обширного пенеппена, который в новейшее время подвергся деформациям с образованием разновысотных поднятий и прогибов. Фрагменты этого пенеппена можно наблюдать на водоразделах и на его склонах, что позволяет определить амплитуды и скорости поднятий за новейшее время и отдельные его этапы.

В новейший тектонический этап (Pg3-Q) палеозойские структуры подверглись деформациям с образованием мегасинклинориев (прогибов) и

мегантисинклинориев (поднятий), а также субширотных взбросов [12]. В аспекте неотектоники – это структуры, которые поныне формируются в условиях преимущественно горизонтального сжатия. Наиболее ярко выражен Иссик-Кульский прогиб, который наследуется одноименным озером. Он выполнен молассовыми мезозойско-кайнозойскими отложениями мощностью более 5 км. К югу прогиб сопряжен с поднятием Терской-Ала-Тоо. В условиях сопряженного развития происходило образование разломов: Южно-Иссиккульского, Предтерской и Центрально-Терской. Первый разлом локализован в зоне сопряжения Иссик-Кульской впадины и адырных поднятий Терской-Ала-Тоо, второй прослеживается на границе хребет-впадина, и третий приурочен к центральной части поднятия Терской-Ала-Тоо. С активностью разломов связывается образование адырных (предгорных) разломов – характерной черты строения Южного Прииссыккуля [1].

Землетрясения – это индикаторы существования в земной коре аномально высоких напряжений. Их образование вызвано горизонтальным сокращением коры в связи с встречной коллизией литосферных плит и блоков [12]. Сильные землетрясения сопровождаются выходом очага на земную поверхность и образованием сейсморазрывов и оползней, на основании которых устанавливаются параметры очага землетрясения – его возраст, магнитуда и сотрясаемость в эпицентральной зоне. Самым известным является разрыв, выявленный в долине сухого сая Тегерек – левого притока р. Тоссор [6, 7]. По нему неодно-



кратно проходили землетрясения, по крайней мере, в течение голоцена, по этой причине он рассматривается в качестве сейсмогенерирующего. Хорошо известен Тоссорский позднеголоценовый сейсмообвал, образованный на южном крыле одноименного поднятия.

Цель исследования – изучение сильной палеосейсмичности и сейсмодислокаций Южного Прииссыккулья методами палео- и археосейсмологии. Сильные землетрясения могут являться причиной катастрофических геологических проблем. В рассматриваемом регионе расположена селитебная, культурная, хозяйственная и др. инфраструктура, тяготеющая к побережью оз. Иссык-Куль [2, 4, 15]. Особо отметим наличие заброшенных после добычи урана радиоактивных хвостохранилищ. Обеспечение безопасности этих объектов на основе изучения сейсмодислокаций, оценки их возраста и периодичности землетрясений, включая определение их структурной позиции является актуальной задачей.

### СЕЙСМОДИСЛОКАЦИИ ЮЖНОГО ПРИИССЫККУЛЬЯ

Сейсмодислокации Южного Прииссыккулья распространены в пределах впадин Тегерек-Сай (Колкагарская мульда) и Каджи-Саз, поднятий Чункурчак и Тегерек-Санчик (Средне- и Нижнетоссорские поднятия соответственно) и зоны Предтерекского разлома. Эти структуры отчетливо выражены в деформациях эпигерцинского пенеплена, который у Колкагарской мульды и Среднетоссорского поднятия сложен красноцветами киргизской серии позднеолигоцен-миоценового возраста, а у Нижнетоссорского поднятия – палеовой толщей тянь-шаньской серии миоцен-плиоценового возраста [12]. На северных крыльях этих структур пенеплен падает под углом 45–50°, а на южных крыльях он более пологий.

Сейсмодислокации исследованы в трех районах: долины рек Тегерек-Сай и Каджи-Саз и окраина современного с. Тоссор на территории средневекового караханидского городища (X–XII вв.).

*Долина ручья Тегерек-Сай* является левым притоком р. Тоссор. В этой долине выявлены сейсморазрывы (рвы), выраженные в том числе структурными уступами; скальные оползни и осыпи (срывы).

На правом склоне руч. Тегерек-Сай расположен протяженный сейсморов – выход древнего сейсмического разрыва на земную поверхность. Его размеры: глубина до 7 м, ширина до 30 м. Магнитуда  $M_s \geq 7$  единиц и сейсмическая интенсивность  $I_0 \geq IX$  баллов [10]. Опыт изучения современных даже самых сильных землетрясений не знает примеров образования дислокаций та-

ких размеров. Возможно, что своими значительными размерами ров обязан нескольким сейсмическим событиям, связанным с одним и тем же глубинным разломом.

На левом склоне рассматриваемого ручья в каледонском интрузивном массиве произошел значительный по размеру сейсмодислокационный срыв (рис. 2). Его длина 2 км, ширина от 500 до 1250 м. Отырв выражен дугообразный стенкой протяженностью 15 км, высота которой изменчива от 60 м на востоке до 100 м на западе. Мощность сорванного массива скальных пород равна ~60 м. Объем обвала составляет приблизительно 10 млн м<sup>3</sup>.

На сошедшем вниз скальном массиве обнаружены необычные для Тянь-Шаня древние захоронения: прямоугольная в плане выкладка камней над могилой. Обычные для Тянь-Шаньского региона сако-усуньские захоронения имеют округлую в плане каменную выкладку [3]. Прямоугольная форма надмогильных выкладок характерна лишь для одного народа, жившего на Тянь-Шане в V–VIII вв. н.э., – для тюрков. Следовательно, можно отметить, что главный скальный срыв мог произойти раньше этого времени.

Восточнее на продолжении сейсморова выявлен сейсмогенный уступ. С целью определения возраста сейсмического события, через западное окончание уступа была пройдена палеосейсмологическая траншея с отбором проб на радиоуглеродный анализ [15]. Горная выработка ориентирована субмеридионально, ее протяженность 5.9 м и глубина около 2.2 м. Из нее из разновозрастных гумуссированных суглинков (палеопочв) были отобраны пробы на радиоуглеродный анализ: DEKG-1, 2, 3 и 4.

Восточная стенка траншеи, сложенная слоистым аллювием, детально описана снизу вверх по разрезу (рис. 3).

Слой 1. Светло-коричневые суглинки с мало-мощными до 15 см линзовидными прослоями дресвы делювиального происхождения. Мощность слоя около 0.7 м.

Слой 2. Палеовая дресва с суглинистым заполнителем делювиального происхождения мощностью 0.7 м. Залегание слоев 1 и 2 нарушено двумя взбросовыми трещинами, падающими на юг под углами 25–30°. Амплитуда смещения по падению у нижнего взброса составляет 1.25 м, у верхнего – 1.6 м.

Слой 3. Палеовая дресва с супесчаным заполнителем делювиально-коллювиального происхождения мощностью 0.9 м. Присутствуют многочисленные валуны и отломы, фрагменты коричневых слабогумуссированных суглинков, которые рассматриваются в качестве коллювиального клина, накопившегося в тыловой части сейсмоуступа.

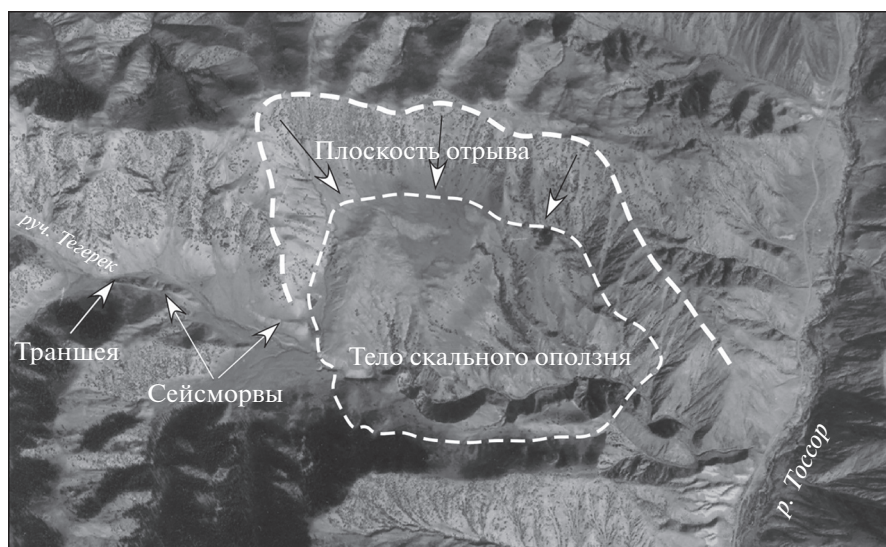


Рис. 2. Тоссорский сейсмодислокационный обвал (скальный оползень) в долине руч. Тегерек-Сай (аэрофотоснимок).

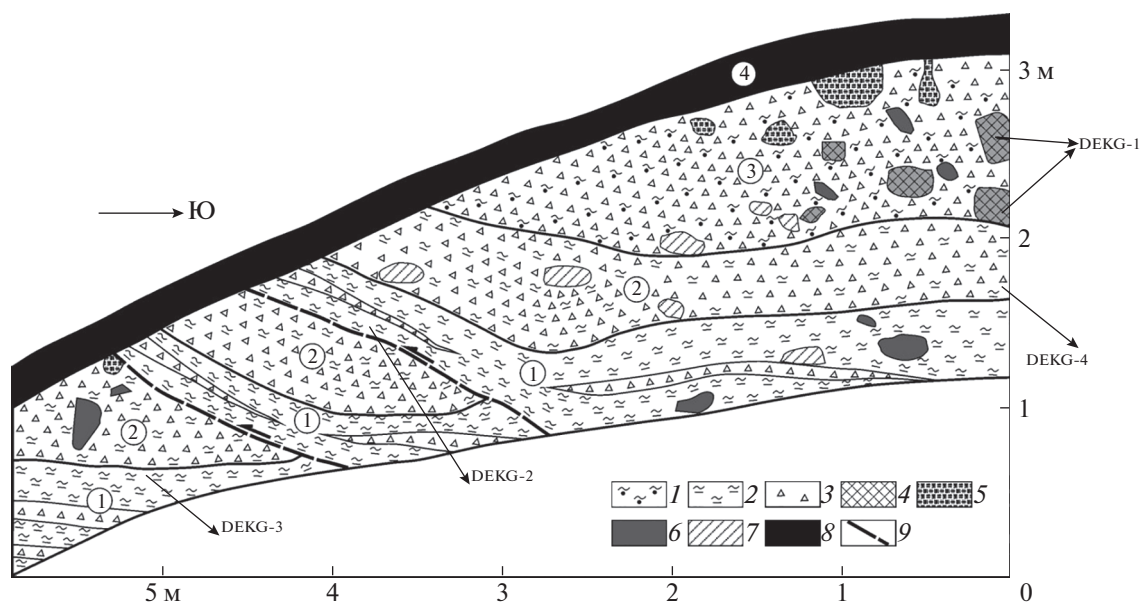
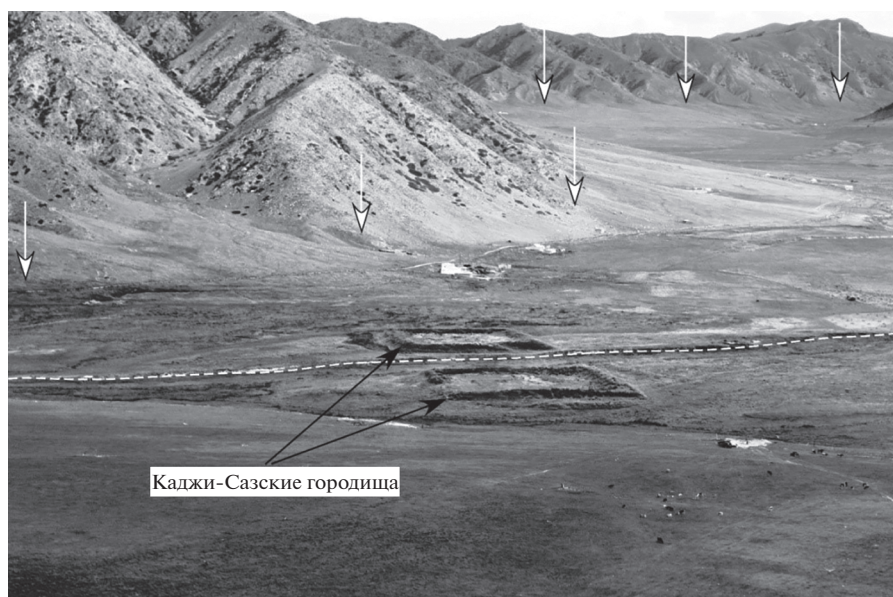


Рис. 3. Восточная стенка палеосейсмологической траншеи в урочище Тегерек-Сай [15]. 1 – супеси, 2 – суглинки, 3 – дрова, 4 – палеопочва, 5 – кротовины, 6 – валуны и отломы, 7 – отпечатки от выпавших валунов, 8 – современная почва, 9 – трещины взбросового типа. Сплошными линиями проведены границы между слоями. В кружках номера слоев. DEKG-1 и т.д. – место отбора проб и их номер.

Слой 4. Коричневая современная бедная гумусом горная почва, несогласно залегающая на подстилающих ее слоях, мощностью до 0,3 м.

Таким образом, в разрезе восточной стенки вскрыты сейсмогенные трещины взбросовой кинематики, принадлежащие, вероятно, самому позднему палеоземлетрясению, так как трещины и коллювиальный клин, накопившейся в тыловой части сеймоуступа, перекрываются исключительно современной почвой (см. слой 3). Воз-

раст отобранных проб был определен в лаборатории Центра по исследованию природы в г. Вильнюс. Датировки показали, что подвижки по сейсмогенерирующему разлому и перетрясывание скального оползня произошли во время последнего достаточно сильного землетрясения, произошедшего на рубеже IX–XI вв. (в пределах ошибки метода). В более раннее время до строительства турецких прямоугольных надмогильных выкладок в V–VIII вв. также могли происходить



**Рис. 4.** Средневековые городища Каджи-Саз (караван-сарай) в одноименном урочище. На переднем плане в виде пунктирной линии — antecedентный участок р. Каджи-Сай, на заднем плане поднятие Тегерек. Стрелками показан Каджи-Сазский взбросовый разлом.

сильные землетрясения, на что указывает сейсморов необычного размера.

В *Каджи-Сазской впадине*, расположенной в сопряжении хребтов Тегерек и Кызыл-Кунгей на севере и хребтом Терской Ала-Тоо на юге, на территории двух средневековых Каджи-Сазских городищ (Западное и Восточное) были проведены палеосейсмологические исследования (рис. 4).

Городища приурочены к урочищу Каджи-Саз, которое ныне заболочено вследствие тектонического подпора растущим, но слабо выраженным в рельефе поднятием Тегерек-Санчик. Это поднятие рассматривается в качестве передового предгорного — адырного. Река, текущая через урочище в оз. Иссык-Куль, прорезает в поперечном направлении это поднятие, что позволяет относить этот участок реки к antecedентному. Подобного типа участки рек указывают на повышенную современную тектоническую активность поднятий, часто связанную с разломами. Данная обстановка не стала исключением. Здесь выделяется Каджи-Сазский неотектонический взброс, по которому происходят поднятие гор Тегерек и Кызыл-Кунгей и их надвигание на внутригорную впадину.

Западное и Восточное городища расположены в 200–300 м друг напротив друга на берегах р. Каджи-Саз. Они предназначались для охраны и обслуживания в средневековое время горного прохода на одной из ветвей Великого шелкового пути. Относительный возраст городищ был определен археологом Д.Ф. Винником по подъемной керамике как караханидский (X–XII вв. н.э.) [3]. Трудно предположить, что указанные караван-

сарай (крепости) были построены в сыром урочище или на болоте, так как есть более высокие и сухие участки в долине. Наиболее вероятно, что караван-сарай были возведены на сухих участках, но интенсивные поднятия хребта Тегерек привели к подпруживанию р. Каджи-Саз и образованию сначала озера, затем болота в одноименной долине.

На основании аэрофотоснимков и полевых наблюдений в зоне Южно-Тегерекского разлома был выявлен сейсмоуступ, свидетельствующий о быстрых импульсных сейсмодвижках по разлому [15]. Относительно небольшой по меркам геологии возраст городищ и их быстрое заболачивание указывают на высокие скорости сеймотектонического поднятия по сейсмоуступу. В поперечном направлении к нему была вырыта траншея по азимуту  $310^\circ$ , длиной 26.5 м и глубиной 2.3 м (рис. 5).

В С–СЗ стенке траншеи были вскрыты слои (снизу вверх), нарушенные разнотипными трещинами.

Слой 1. Бурые отложения пролювиального происхождения мощностью более 0.5 м.

Слой 2. Неокатанные и слабоокатанные глыбы и валуны со светло-коричневым суглинистым заполнителем мощностью 0.9 м. Слой нарушен двумя системами разрывов неясной кинематики. Из приповерхностной части слоя были взяты раковины пресноводных брюхоногих моллюсков (раковин) на радиоуглеродный анализ методом AMS<sup>14</sup>C. Результаты анализа показали, что их возраст составляет  $42100 \pm 1500$  ВР (лет назад)



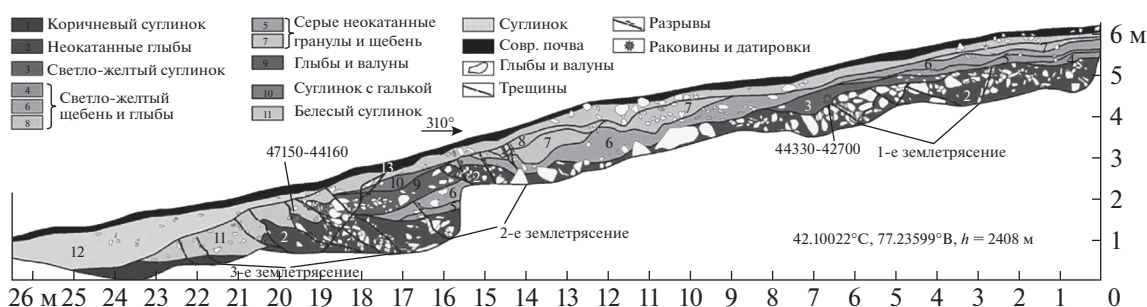


Рис. 5. Строение отложений в С-С3 стенке траншеи [15]. Цифры 1, 2 и далее по порядку – номера слоев. Цифры 47150-44160 и 44330-42700 калиброванный возраст (*cal*) проб Poz-66170 и Poz-66202 соответственно и места их отбора.

(обр. Poz-66170). Калиброванный (уточненный) возраст (*cal*) – 47 150–44 160 ВР.

Слой 3. Светло-желтая супесь мощностью 0.5 м. В основании слоя были собраны раковины пресноводных брюхоногих моллюсков на AMS  $^{14}\text{C}$ . Возраст раковин составил  $39\,700 \pm 1000$  лет назад (обр. Poz-66202). Калиброванный возраст (*cal*) – 44 330–42 700 ВР.

Слои 4, 6, 8. Линзовидное чередование крупного щебня и глыб со светло-желтым супесчаным заполнителем. Линзы разной мощности.

Слои 5 и 7. Серая дресва и щебень с песчаным цементом. Мощность отдельных линз составляет от 0.1 до 0.9 м. В них развита система обратных разрывов, падающих на север. Смещение слоев составляет от 0.1 до 1.8 м.

Слой 9. Серые неокатаные и полуокатаные валуны и глыбы с песчаным и супесчаным заполнителем.

Слой 10. Серая супесь с щебнем неясной мощности.

Слой 11. Беловатая супесь мощностью 1 м. В слоях 1, 2 и 11 были обнаружены несколько обратных разрывов и трещин с северным падением. Смещения по плоскостям разрывов составляют 0.1–0.7 м.

Слой 12. Светло-коричневая супесь мощностью до 1 м.

Слой 13. Завершает разрез современная горная почва мощностью 0.2–0.3 м.

По наличию трещин и разрывов и, согласно определению возраста образцов, установлено, что всего было три землетрясения. Первое самое древнее произошло приблизительно 40 000 лет назад, второе и третье позже, точный возраст которых установить не удалось. Но по генерациям трещин и строению рельефа выявлено, что во время первого землетрясения образовались трещины в нижней части уступа, во время второго – трещины в верхней его части. Во время третьего землетрясения – самого молодого – был образован уступ в современной форме. Разрывы (взбро-

сы) 2-го и 3-го землетрясений имеют отчетливую взбросовую кинематику. По величине косейсмических разрывов с использованием эмпирического соотношения Уэллса и Копперсмита оценена моментная магнитуда 2-го и 3-го землетрясений:  $M_w = 7.1$  и  $M_w = 6.8$  соответственно [10, 16].

За пределами городища Каджи-Саз в северном крыле одноименной впадины в неоген-четвертичных отложениях, вскрытых р. Каджи-Сай, установлены современные разрывы-взбросы, которые подтверждают воздействие напряжений сжатия на впадину со стороны поднятия Тегерек. Под его воздействием формируется адырное поднятие – Тегерек-Санчик, с ростом которого связаны тектоническое подпруживание и формирование antecedentного участка р. Каджи-Сай.

На западной окраине современного села Тоссор были проведены археосейсмологические исследования средневекового караханидского городища – торткуль Тоссор (X–XII вв.) (рис. 6).

Караханидский возраст городища был определен Д.Ф. Винником [3]. Торткуль Тоссор находится в 20 км на В–СВ от описанных Каджи-Сазских городищ в пределах ядра растущего Тоссорского антиклинального поднятия, которое слабо выражено в рельефе [8]. Его южное крыло крутое и относительно узкое сложено позднеплейстоценовыми суглинисто-песчаными отложениями озерного генезиса ( $Q_{III}$ ). Пологое и широкое северное крыло перекрыто аллювиальными крупнозернистыми песками. Южное крыло вскрыто в карьере, вырытом в непосредственной близости на южной окраине городища. Азимут падения крыла  $180^\circ$  под углом  $20^\circ$ . Аллювиально-пролювиальная равнина, отвечающая пологому крылу, падает на север – к Иссук-Кулю. Перед южной стеной городища крыло быстро меняет угол наклона на противоположный, т.е. на северный  $360^\circ$ .

Для палеосейсмологических исследований была вырыта широтная траншея, вскрывшая в поперечном направлении восточную стену городища [8]. В траншее и стене выявлены отчетливые



**Рис. 6.** Средневековое городище торткуль Тоссор. Стрелками указаны остатки разрушенных башен некогда укрепленного городища. Помпезные башни – современные киргизские захоронения.

разной генерации трещины, относящиеся к двум сейсмическим событиям разного возраста.

Во время первого события обломки верхней части стены отлетели в восточную сторону на расстояние до 6 м, сопоставимое с изначальной высотой стены. Это факт свидетельствует о сильных сейсмических сотрясениях, так как при обычном “статическом” разрушении стен со временем подавляющая часть обломков должна была упасть на расстояние, не превышающее 1/3 высоты стены [14]. Точную дату этого события установить не удалось, но по накопившимся в основании стены пылевато-песчаным частицам и характеру нарушений, вскрытых в канаве, можно уверенно предположить, что первое событие случилось намного лет раньше не менее сильного второго события.

Во время второго сейсмического события нижняя часть восточной стены подверглась сильному нарушению, включая накопившийся после первого события мелкозем – пылевато-песчаные образования. В восточной части траншеи образовалась трещиноватость по типу “цветочной структуры”, в западной части – клинообразная раскрытая трещина, внутрь которой провалились обломки верхней части стены. Под ними обнаружен обширный слой углей от пожарищ мощностью до 3 см. Радиоуглеродный возраст этих углей на  $C^{14}$  показал 1020–1190 гг. н.э. (XI–XII вв. н.э.), что согласуется с возрастом археологических артефактов.

При интенсивных сейсмических колебаниях большой ущерб с жертвами приносили не только механическое разрушения стен, но пожары, связанные с повреждением и разрушением светильников и печей. Разрушение источников света и тепла в средневековое время приводило к началу больших пожарищ, под действием которых довершался окончательный развал построек. Подобные факты с максимальным количеством жертв при пожарах в населенных пунктах наблюдаются ныне при современных землетрясениях.

### СТРУКТУРНО-ТЕКТОНИЧЕСКАЯ ПОЗИЦИЯ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

При изучении сейсмических событий важное значение имеет структурно-тектоническая оценка плейстосейстовых зон землетрясений. В Южном Прииссыккулье они приурочены к разломам, сопряженным с антиклинальными изгибами (поднятиями), и рассматриваются как зоны современных дислокаций сейсмогенного типа. В рельефе они выражены предгорными адырами, согласными с однопорядковыми впадинами. Различаются следующие подобного типа структуры: поднятие-адыр Тегерек-Санчик, сопряженное с Каджи-Сазской впадиной; поднятие-адыр Чункурчак, сочленяющееся с впадиной Тегерек-Сай. Все структурные формы характеризуются южно-асимметричным строением.

По морфолого-кинематическому типу разломы, связанные с адырами, являются взбросами, падающими на север, т.е. в обратную сторону относительно Предтерского и Южно-Иссыккульского глубинных разломов, падающих на юг (см. рис. 1). Адырные взбросы локализованы на сопряжении крупных новейших мегаструктур: поднятия Терской Ала-Тоо (мегантиклинорий) и впадины Иссык-Куль (мегасинклинорий). Установлено, что по глубинным разломам происходит надвигание поднятия Терской Ала-Тоо, представленного преимущественно палеозойскими складчато-разрывными структурами, на третичные отложения впадины Иссык-Куль [9]. В процессе надвигания крыло впадины деформируется с образованием адырных поднятий (форбергов). Деформации сопровождаются интенсивной сейсмической активностью.

Разломы со встречным типом падения плоскостей формируются под влиянием общей причины – субгоризонтального сокращения земной коры Тянь-Шаня в результате схождения Индостанской и Евразийской литосферных плит [13]. Вещественно-структурные процессы приводят к изменению мощности земной коры и литосферы в целом и формированию гор – орогенезу. По при-

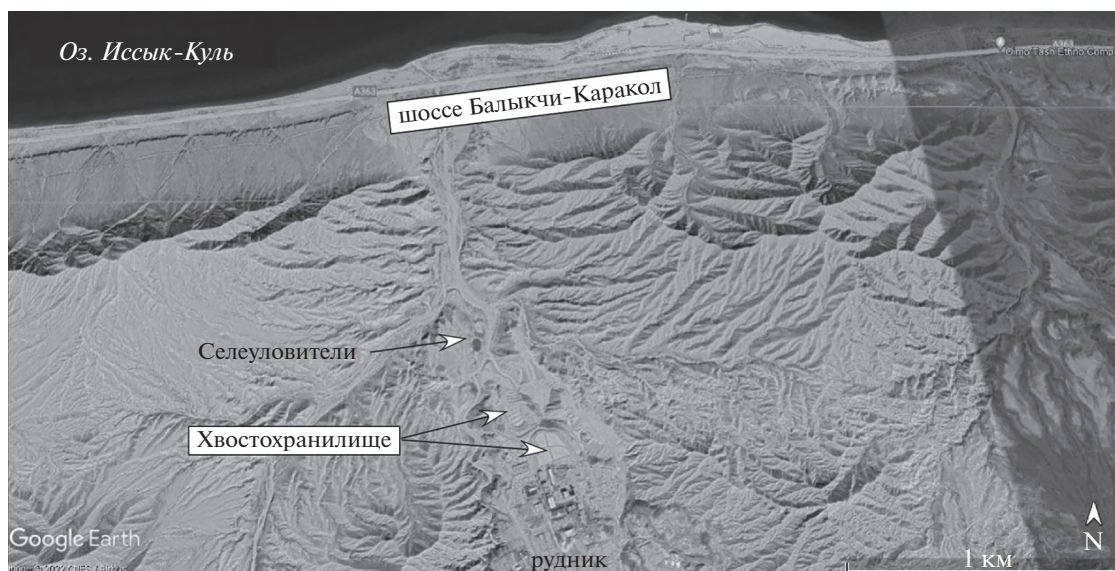


Рис. 7. Отработанный Каджи-Сайский урановый рудник и его радиоактивное хвостохранилище (космический снимок).

чине встречных деформаций, в основном южных и северных румбов, в разломах происходит концентрация напряжений и деформаций, что является причиной появления потенциальных очагов сейсмичности. Разрядка напряжений приводит к землетрясениям, в том числе катастрофического характера. Палеосейсмологические и современные инструментальные исследования показали, что накопление и сейсмогенная разрядка напряжений происходят с определенной циклическостью. В южном Прииссыккулье повторяемость сильных сейсмических событий происходит раз в 200–300 лет.

### ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ КАДЖИ-САЙСКОГО УРАНОВОГО ХВОСТОХРАНИЛИЩА

Отходы добычи урана – это “дамклов меч”, постоянно висящий над жителями Республики Киргизия в районах расположения радиоактивных хвостохранилищ, в том числе и Каджи-Сайского. Большинство этих хранилищ – наследие советских времен – всего лишь огорожены невысокими до 1.5–2.0 м дамбами, а отходы перекрыты небольшим по мощности 0.5–1.0-метровым слоем глины и гравия. Сильная сейсмичность, являющаяся мгновенной и приводящая к образованию разломов-уступов, обвалов скальных пород, оползневых склонов, лавин и селевых потоков, непосредственно угрожает этим площадкам.

Каджи-Сайское урановое хранилище расположено среди адыров с абс. отм. 1607–1896 м в долинах рек Каджи-Саз и Тоссор в 4 км к В-СВ от пос. Каджи-Сай. В геологическом отношении оно приурочено к сопряжению новейшего подня-

тия Терской Ала-Тоо и впадины (котловины) Иссык-Куль (см. рис. 1). Общая площадь, занятая радиоактивными отходами, составляет приблизительно 2 га. Объем отходов – 250 тыс. м<sup>3</sup>. Мощность эффективной дозы облучения 1 мкЗв/ч, радоноразделение 1000 мБк/(м<sup>2</sup>/с) [11]. Зброшенны́е к настоящему времени отходы (отвалы) лежат на неогеновых гравийно-песчаных отложениях аллювиально-пролювиального генезиса иссык-кульской свиты нижне-среднего плиоцена (N<sub>1–2is</sub>) (рис. 7).

Природная устойчивость склонов долин, сложенных иссык-кульской гравийно-песчаной толщей, была нарушена террасированием согласно технологии складирования радиоактивных отходов. Наличие техногенных террас, высота которых около 15 м, и нагрузка отходов на них приводят к гравитационному разваливанию нелитифицированной гравийно-песчаной толщи. Дамбы, окружающие отвалы, подвергаются разрушению в силу временного фактора. Обычно это случается во время относительно несильных землетрясений и обильных атмосферных осадков, которые довершают развал. Установлено, что дождевые и талые воды просачиваются через нарушенное радиоактивное хранилище и растекаются в разных направлениях. Воды, размывающие хвостохранилище, текут не только в селеуловитель, но и мимо него через нарушенные дамбы в направлении оз. Иссык-Куль. В этом аспекте инженерная защита отвалов по своей эффективности и состоянию не отвечают существующей угрозе.

Сооруженные вдоль южного склона оз. Иссык-Куль лавино- и селеуловительные преграды республиканского значения по местоположению



и устойчивости к задержанию ударного потока не соответствуют существующей опасности из-за давности возведения. Площадка радиоактивного хранилища, расположенная в пределах лавино- и селеоопасных склонов, включая оползневые, может быть подвержена их негативному воздействию. Большую опасность вызывает большое скопление воды в верховьях саев в пролювиальных отложениях и каменных глетчерах. В случае сильных землетрясений устаревшие лавино- и селеуловительные преграды могут быть разрушены, и грязе- и водокаменные потоки устремятся через хранилище в сторону жилых построек, сельскохозяйственных угодьев и шоссе Балыкчи-Каракол к оз. Иссык-Куль.

Палеосейсмологические исследования показывают, что Каджи-Сайское хвостохранилище радиоактивных отходов может быть подвержено сейсмическому воздействию и опасному влиянию лавинных и селевых потоков. Разрушение уранового хранилища приведет к катастрофическим последствиям — радиоактивному заражению большей территории, включая оз. Иссык-Куль. Восстановление и дезактивация последствий катастрофы потребуют много времени и больших финансовых и трудовых затрат. Существующая геозекологическая угроза требует безотлагательного проведения инженерно-геологических исследований. Их следует направить на комплексную оценку геозекологической безопасности района и разработку современных защитных мероприятий.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В плейстосейстовых зонах древних землетрясений выявлены протяженные рвы и уступы, а также значительные скальные обрушения (обвалы, срывы), связанные с сильными землетрясениями. Палеосейсмологическими и археосейсмологическими методами определен возраст сильных сейсмических событий, их магнитуда и повторяемость. Произшедшие события относятся к V–XII вв., магнитуда оценена от  $M \geq 6.8$  (до 7.1) единиц, интенсивность колебаний —  $I_0 \geq IX$  баллов и повторяемость — раз в несколько сот лет. Выявленные сильные землетрясения по сотрясаемости грунтов оказались выше ранее определенных в VIII баллов.

Структурная позиция сильных землетрясений, очаги которых локализуются в верхней части земной коры, связывается с неотектоническими зонами дислокаций, развивающихся в условиях встречных напряжений и деформаций. Глубинные магистральные взбросо-надвиги имеют южное падение, предгорные поднятия-адыры взбросового типа — северное. Последние локализованы во фронтальной части крупных поднятий, надвигающихся на прогибы, что является причиной их сейсмичности.

Площадка Каджи-Сайского уранового хвостохранилища, расположенная в пределах очагов сильных землетрясений, — источник потенциальной экологической катастрофы в Южно-Прииссыккульском регионе. Известно, что под влиянием сильных землетрясений Тюркское государство (V–VIII вв.) была в значительной степени разрушена, включая политическую, административную и военную структуру. Это позволило племенам калмыков пройти рассматриваемый регион, практически не встречая активного сопротивления. Серия землетрясений в IX–XII вв. поставила “жирный крест” на земледельческой цивилизации Прииссыккуля вообще. В этой связи в исследуемом регионе необходимы систематические палеосейсмологические исследования с учетом современных инструментальных данных в аспекте оценки сейсмической, лавинной, селевой и оползневой безопасности.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абдрахматов К.Е., Джанузакоев К.Д., Фролова А.Г., Погребной В.Н. Карта сейсмического районирования территории Кыргызской Республики (Объяснительная записка). Бишкек: Илим, 2012. 51 с.
2. Биосферная территория Иссык-Куль. Культурно-исторические памятники. Бишкек: Илим, 2002. 80 с.
3. Винник Д.Ф., Лесниченко Н.С., Санарова А.В. Работы на Иссык-Куле. Археологические открытия в 1977 году. М.: Наука, 1978. С. 568–560.
4. Иванов П.П. Материалы по археологии котловины Иссык-Куля // Тр. Института истории АН Кыргызской ССР. Вып. III. Фрунзе: Илим, 1957. С. 65–99.
5. Кальметьева З.А., Миколайчук А.В., Молдобекоев Б.Д., Мелешко А.В. и др. Атлас Землетрясений Кыргызстана. Бишкек: ЦАИИЗ, 2009. 73 с.
6. Корженков А.М., Абдиева С.В., Мажейка Й., Муралиев А.М. и др. О неизвестных сильных голоценовых землетрясениях на юге Иссык-Кульской котловины, Тянь-Шань // Вопросы инженерной сейсмологии. 2014. Т. 41. № 2. С. 30–40.
7. Корженков А.М., Рогожин Е.А., Шен Ю., Деев Е.В., Абдиева С.В. и др. Палеосейсмологические и археосейсмологические исследования по международным проектам РФФИ // Вестник РФФИ. 2014. № 1 (81). С. 15–20.
8. Корженков А.М., Кольченко В.А., Лужанский Д.В., Абдиева С.В. и др. Археосейсмологические исследования и структурная позиция средневековых землетрясений на юге Иссык-Кульской Впадины (Тянь-Шань) // Физика Земли. 2016. № 2. С. 71–86.
9. Сильные исторические и палеоземлетрясения Прииссыккуля и их положение в структуре Северного Тянь-Шаня. М.: ИФЗ РАН, 2018. 174 с.
10. Стром А.Л., Никонов А.А. Соотношения между параметрами сейсмогенных разрывов и магнитудой землетрясений // Физика Земли. 1997. № 12. С. 55–67.

11. *Шереметов А.И.* Ликвидация наследия бывших урановых производств в странах СНГ. Ч. 2. Основные технические решения. 2017. [https://yandex.ru/search/?lr=20728&text=каджи-сайское+хвостохранилище&src=suggest\\_Pers](https://yandex.ru/search/?lr=20728&text=каджи-сайское+хвостохранилище&src=suggest_Pers)
12. *Чедия О.К., Джумадылова Ч.К., Трунилин С.И.* Предтерсейский краевой разлом в междуречье Джетыюгуз-Тоссор // Известия АН. Кирг. ССР. Физ.-тех. и матем. науки. 1988. № 1. С. 79–88.
13. *Burgette R.J.* Uplift in response to tectonic convergence: The Kyrgyz Tien Shan and Cascadia subduction zone. Ph.D. Thesis. University of Oregon, USA. 2008. 242 p.
14. *Korjenkov A.M., Mazor E.* Seismogenic origin of the ancient Avdat ruins, Negev desert, Israel // Natural Hazards. 1999. V. 18. № 3. P. 193–226.
15. *Korzhenkov A.M., Deev E.V.* Underestimated seismic hazard in the south of the Issyk-Kul Lake region (Northern Tien Shan) // Geodesy and Geodynamics. 2017. 8 (8). P. 169–180.
16. *Wells D.L., Coppersmith K.J.* Empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture area, and surface displacement // Bull. Seismol. Soc. Am. 1994. V. 84. P. 974–1002.

## PALEOSEISMICITY OF THE SOUTHERN ISSYK-KUL LAKE REGION AND GEOECOLOGICAL PROBLEMS OF THE KADZHI-SAI URANIUM TAILING FACILITY (KYRGYZ REPUBLIC)

**L. A. Korzhenkova<sup>a,#</sup>, A. M. Korzhenkov<sup>b</sup>, and V. M. Makeev<sup>a,##</sup>**

<sup>a</sup> *Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences, Ulansky per., 13, str. 2, Moscow, 101000 Russia*

<sup>b</sup> *Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, B. Gruzinskaya ul., 10, str. 1, Moscow, 123242 Russia*

<sup>#</sup> *E-mail: korjenkova2404@mail.ru*

<sup>##</sup> *E-mail vmakeev@mail.ru*

The research is aimed at studying rare and strong paleoseismicity in the southern Issyk-Kul Lake region using the methods of paleo- and archeoseismology. In the Middle Ages, this region was under the recurrent impact of earthquakes, which could have led to catastrophic consequences, i.e., the destruction of medieval civilizations. These disastrous processes are not excluded now. The research region includes the southern coastal zones of Lake Issyk-Kul with their industrial, residential, economic and other infrastructure. For its safe functioning, knowledge about the mode of earthquakes in the past and in the present is necessary. Paleoseismological studies in the southern Issyk-Kul Lake region permitted us for the first time to identify the centers of strong ancient earthquakes in relief, i.e., the seismic scarps in the immediate vicinity of the Kadzhi-Sai tailing dump. In the isoseismic earthquake areas, significant rock failures were registered: landslides, disruptions and landslides. Based on the radiocarbon dating of samples, the age of these seismic events were determined. Their recurrence as once every several hundred years was calculated, with the magnitude  $M_s \geq 7$  and the seismic intensity  $I_0 \geq IX$ . Structurally, the earthquakes, with their sources being localized in the upper part of the earth's crust, are associated with neotectonic and modern deformation zones. These are deep thrusts of a southern dip and piedmont uplifts-adysrs of a reverse-dip type and a northern dip. The latter are localized in the frontal part of large uplifts moving towards the troughs. The formation of these zones with an opposite type of development is associated with the subhorizontal contraction of the Tien Shan Earth's crust and its orogeny. Matter and structural movements lead to the redistribution of the Earth's crust thickness and the formation of high mountains. Due to counter deformations, stress and strain concentrate in faults to form potential seismic centers, including catastrophic. The territory of the Kadzhi-Sai uranium-tailing dump is under the threat of destruction due to seismic hazard and secondary intense exogenous processes, i.e., landslides and mudflows. Earthquakes, as a rule, cause landslides in semi-hard Neogene rock of the Issyk-Kul suite, on which loose radioactive waste is stored. It has been found that atmospheric precipitation eroding the tailing dump flows not only into the mudflow trap, but also passes it towards Lake Issyk-Kul. The water that has been accumulated behind natural dams on the slopes of ridges may once break through the obstacles holding them and turn into a powerful debris flow. The constructed mudflow traps are not currently adequate to the existing threat in terms of their volume and location. To arrange engineering protection of radioactive waste sites from hazardous processes, it is proposed to conduct additional studies for assessing seismic, landslide and mudflow hazards.

**Keywords:** *paleoseismology, archeoseismology, faults, seismic scarps, landslides and taluses, rockslides, uranium tailings, tortkuls, adysrs, caravanserai*



## REFERENCES

1. Abdrakhmatov, K.Ye., Dzhanzuzakov, K.D., Frolova, A.G., Pogrebnoi, V.N. *Karta seismicheskogo raionirovaniya territorii Kyrgyzskoi Respubliki (Ob'yasnitel'naya zapiska)* [Seismic zoning map of the Kyrgyz Republic territory (Explanatory note)]. Bishkek, Ilim Publ., 2012, 51 p. (in Russian)
2. *Biosfernaya territoriya Issyk-Kul'. Kul'turno-istoricheskie pamyatniki* [Issyk-Kul biosphere territory. Cultural and historical monuments]. Bishkek, Ilim Publ., 2002, 80 p. (in Russian)
3. Vinnik, D.F., Lesnichenko, N.S., Sanarova, A.V. *Raboty na Issyk-Kule. Arkheologicheskiye otkrytiya v 1977 godu* [Issyk-Kul studies. Archaeological discoveries in 1977]. Moscow, Nauka Publ., 1978, pp. 568–560. (in Russian)
4. Ivanov, P.P. *Materialy po arkheologii kotloviny Issyk-Kulya* [Data on the Issyk-Kul basin archeology]. *Tr. Instituta istorii AN Kirgizskoi SSR. Vyp. III.* Frunze, Ilim Publ., 1957, pp. 65–99. (in Russian)
5. Kal'met'yeva, Z.A., Mikolaichuk, A.V., Moldobekov, B.D., Meleshko, A.V. et al. *Atlas zemletryaseni Kyrgyzstana* [Atlas of Kyrgyzstan earthquakes]. Bishkek, TSAIIZ Publ., 2009, 73 p. (in Russian)
6. Korzhenkov, A.M., Abdieva, S.V., Mazheika, Y., Muraliev, A.M., et al. *O neizvestnykh sil'nykh golotsenovykh zemletryasenyakh na yuge Issyk-Kul'skoi kotloviny, Tyan'-Shan'* [About unknown strong Holocene earthquakes in the south of Issyk-Kul basin, Tien Shan]. *Voprosy inzhenernoi seismologii*, 2014, vol. 41, no. 2, pp. 30–40. (in Russian)
7. Korzhenkov, A.M., Rogozhin, Ye.A., Shen, Yu., Deyev, Ye.V., Abdieva, S.V., et al. *Paleoseismologicheskie i arkheo-seismologicheskie issledovaniya po mezhdunarodnym proektam RFFI* [Paleoseismological and archeo-seismological researches under RFBR international projects]. *Vestnik RFFI*, 2014, no. 1 (81), pp. 15–20. (in Russian)
8. Korzhenkov, A.M., Kol'chenko, V.A., Luzhanskii, D.V., Abdiyeva S.V., et al. *Arkheo-seismologicheskie issledovaniya i strukturnaya pozitsiya srednevekovykh zemletryaseni na yuge Issyk-Kul'skoi Vpadiny (Tyan'-Shan')* [Archaeoseismological studies and the structural position of medieval earthquakes in the south of Issyk-Kul depression, Tien Shan.]. *Fizika Zemli*, 2016, no. 2, pp. 71–86. (in Russian)
9. *Sil'nyye istoricheskiye i paleozemletryaseniya Priissyk-kul'ya i ikh polozheniye v strukture Severnogo Tyan'-Shanya* [Strong historical and paleoearthquakes in the Issyk-Kul region and their position in the Northern Tien Shan structure]. Moscow, IFZ RAN Publ., 2018, 174 p. (in Russian)
10. Strom, A.L., Nikonov, A.A. *Sootnosheniya mezhdu parametrami seismogennykh razryvov i magnitudoi zemletryaseni* [Correlations between the seismogenic ruptures parameters and the earthquakes magnitude]. *Fizika Zemli*, 1997, no. 12, pp. 55–67. (in Russian)
11. Sheremetov, A.I. *Likvidatsiya naslediya byvshikh uranovykh proizvodstv v stranakh SNG. Chast' 2: Osnovnye tekhnicheskie resheniya* [Liquidation of the former uranium production legacy in the CIS countries. Part 2: Basic technical solutions] 2017, [https://yandex.ru/search/?lr=20728&text=kadziayskoye+khvostokhranilishche&src=suggest\\_Pers](https://yandex.ru/search/?lr=20728&text=kadziayskoye+khvostokhranilishche&src=suggest_Pers) (in Russian)
12. Chediya, O.K., Dzhumadylova, Ch.K., Trunilin, S.I. *Predterskeiskii kraevoi razlom v mezhdurech'ye Dzhetyoguz-Tossor* [Cis-Terskei marginal fault in the Dzhetyoguz-Tossor interfluve]. *Izvestiya AN Kirg. SSR. Fiz.-tekhn. i matem. nauki*, no. 1, 1988, pp. 79–88. (in Russian)
13. Burgette, R.J. *Uplift in response to tectonic convergence: The Kyrgyz Tien Shan and Cascadia subduction zone*. Ph.D. Thesis. University of Oregon, USA. 2008. 242 p.
14. Korjenkov, A.M., Mazor, E. *Seismogenic origin of the ancient Avdat ruins, Negev desert, Israel*. *Natural Hazards*, 1999, vol. 18, no. 3, pp. 193–226.
15. Korzhenkov, A.M., Deev, E.V. *Underestimated seismic hazard in the south of the Issyk-Kul Lake region (Northern Tien Shan)*. *Geod. Geodyn.*, 2017, 8 (8), pp. 169–180.
16. Wells, D.L., Coppersmith, K.J. *Empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture area, and surface displacement*. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 1994, vol. 84, pp. 974–1002.

---

---

**ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОПРИРОДНЫЕ  
ПРОЦЕССЫ**

---

---

УДК 528.873

**МОДЕЛИРОВАНИЕ МОРФОЛОГИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ  
АБРАЗИОННЫХ БЕРЕГОВ С РАЗВИТИЕМ ОПОЛЗНЕВЫХ ПРОЦЕССОВ  
В КРИОЛИТОЗОНЕ**© 2022 г. А. С. Викторов<sup>1,\*</sup><sup>1</sup> *Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН,  
Уланский пер., 13, стр. 2, Москва, 101000 Россия**\*E-mail: vic\_as@mail.ru*

Поступила в редакцию 10.10.2022 г.

После доработки 18.10.2022 г.

Принята к публикации 20.10.2022 г.

Цель настоящего исследования – анализ поведения количественных морфологических особенностей абразионных берегов с развитием оползневых процессов в криолитозоне и их эмпирическое изучение. Исследование сосредоточено на морфологических особенностях верхней части оползней, характерной особенностью которых являются дуги, ограничивающие оползневое тело на границе с водораздельной поверхностью, и их хорды. Изучение проводилось на пяти ключевых участках полуостровов Канин нос и Ямал. Из проведенного анализа следует, что вероятностное распределение длин хорд, наблюдаемых в каждый момент всей совокупности оползней, отличается от распределения размеров хорд образующихся молодых оползней за счет стирания части оползневых тел или полного стирания оползней. Как показали результаты математического моделирования, в условиях относительного однородного по геологическим и геоэкологическим характеристикам абразионного склона устанавливается динамическое равновесие, которое проявляется в стабилизации средней плотности расположения оползней и стабилизации вероятностного распределения их размеров по простиранию склона. Получена аналитическая зависимость между вероятностным распределением размеров хорд образующихся молодых оползней и вероятностным распределением хорд всех представленных оползней, в том числе частично стертых более поздними оползнями, а также между средней плотностью расположения оползней вдоль береговой линии и параметрами распределения размеров хорд образующихся молодых оползней. Анализ эмпирических данных показал соответствие распределений наблюдаемых длин хорд оползней логнормальному распределению на изученных ключевых участках.

**Ключевые слова:** *математическое моделирование морфологических особенностей оползней, абразионные берега, математическая морфология ландшафта, динамическое равновесие берегов*

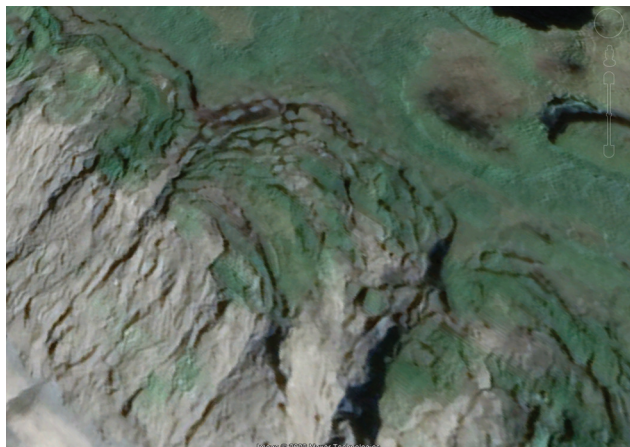
**DOI:** 10.31857/S0869780922060078**ВВЕДЕНИЕ**

Многие исследования посвящены морфологическим особенностям оползней. Обширная группа работ посвящена исследованию этих процессов в связи с отступанием берегов в зоне развития многолетнемерзлых пород [1, 4, 6, 7]. Однако большинство исследований исследуют оползневые процессы в связи с отступанием берегов и, соответственно, изучаются протяженность оползней и изменения в направлении, перпендикулярном береговой линии. В то же время мало внимания уделялось анализу протяженности оползневых тел вдоль бровки склона и ее количественным параметрам.

Цель настоящего исследования – анализ динамики количественных показателей морфологических особенностей абразионных берегов с разви-

тием оползневых процессов в криолитозоне и их эмпирическое изучение.

Исследование проведено на примере нескольких участков абразионных берегов криолитозоны полуостровов Ямал и Канин нос. В их пределах развит комплекс термоабразионных и термоденудационных, в том числе, оползневых, процессов. Рассматриваемые участки представляют собой сочетание циркуобразных фрагментов с развитием оползней разного возраста, как правило, с наличием обрывистого участка в нижней части склона, наиболее подверженного воздействию абразионных процессов. Местами на склоне наблюдаются дугообразные остаточные участки водораздельной поверхности, отвечающие различным стадиям оползания. Нередко на склоне раз-



**Рис. 1.** Типичное изображение абразионных берегов с развитием оползневых процессов в криолитозоне на материалах космической съемки.

вита эрозия. Типичный вид участка абразионного берега представлен на рис. 1.

Исследование было сосредоточено на морфологических особенностях верхней части оползней на границе с прилегающей водораздельной поверхностью. Характерной особенностью этой части оползневых тел являются дуги, ограничивающие оползневое тело и являющиеся одновременно его границей с водораздельной поверхностью. Несколько схематизируя, главнейшие морфологические особенности оползневого тела в рассматриваемой области описываются, прежде всего, длиной хорды, которая соединяет концы дуги и длиной дуги, которая в значительной мере коррелирует с длиной хорды.

При развитии оползания на склоне происходят следующие основные процессы:

- формирование нового оползневого тела и соответствующих дуг и хорд,
- стирание части старых (уже существующих) оползневых тел с коррекцией соответствующих дуг и хорд,
- исчезновение оползневого тела и, соответственно, его дуги и хорды в случае полного стирания существующего оползня новым оползневым телом.

На основании изложенного можно конкретизировать задачи работы.

Из проведенного анализа следует, что вероятностное распределение длин хорд, наблюдаемых в каждый момент совокупности оползней, отличается от распределения размеров хорд образующих молодых оползней за счет стирания части оползневых тел и даже полного стирания оползней. Представляет интерес выявление взаимосвязи размеров хорд наблюдаемого ансамбля оползней и образующихся молодых оползней, а также

получение информации о наблюдаемом вероятностном распределении длин хорд.

Другой существенный вопрос – изменение средней плотности расположения оползней вдоль бровки склона с течением времени. Представляется очевидным, что на любом участке склона будет формироваться бесконечно большое число оползней при достаточно длительном времени их развития. Но при этом, учитывая стирание уже существующих оползней, остается неясным, какой будет наблюдаемая плотность расположения оползней, и от каких факторов она будет зависеть.

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Методика исследования включала:

- формирование математической модели развития морфологических особенностей (длин хорд оползней) абразионных берегов с развитием оползневых процессов;
- математический анализ модели развития морфологических особенностей абразионных берегов с развитием оползневых процессов;
- эмпирическое изучение распределения длин хорд оползней, включающее:
  - выбор ключевых участков,
  - измерение необходимых параметров по материалам космической съемки,
  - статистическую обработку полученных характеристик морфологического строения оползней и анализ полученных результатов.

Выбор ключевых участков выполнен на основе требований относительной морфологической однородности участка и однородности физико-географических условий. Морфологическая однородность анализировалась на основе материалов космической съемки высокого разрешения, и она определялась на основании однотипности сочетаний элементов изображения, отражающих однотипность морфологического строения рассматриваемого участка. Однородность геолого-геоморфологических условий анализировалась на базе материалов государственной геологической съемки с использованием космических снимков. В итоге было выбрано пять участков протяженностью 2.5–10.1 км, имеющих в целом прямолинейное простираение (рис. 2) и расположенных в пределах береговой линии полуостровов Канин нос и Ямал.

Для анализа морфологических особенностей были использованы космические снимки высокого разрешения. На них были отдешифрированы бровки склонов и выделены оползневые дуги, а также проведены хорды. Измерение хорд выполнялось с помощью средств геоинформацион-

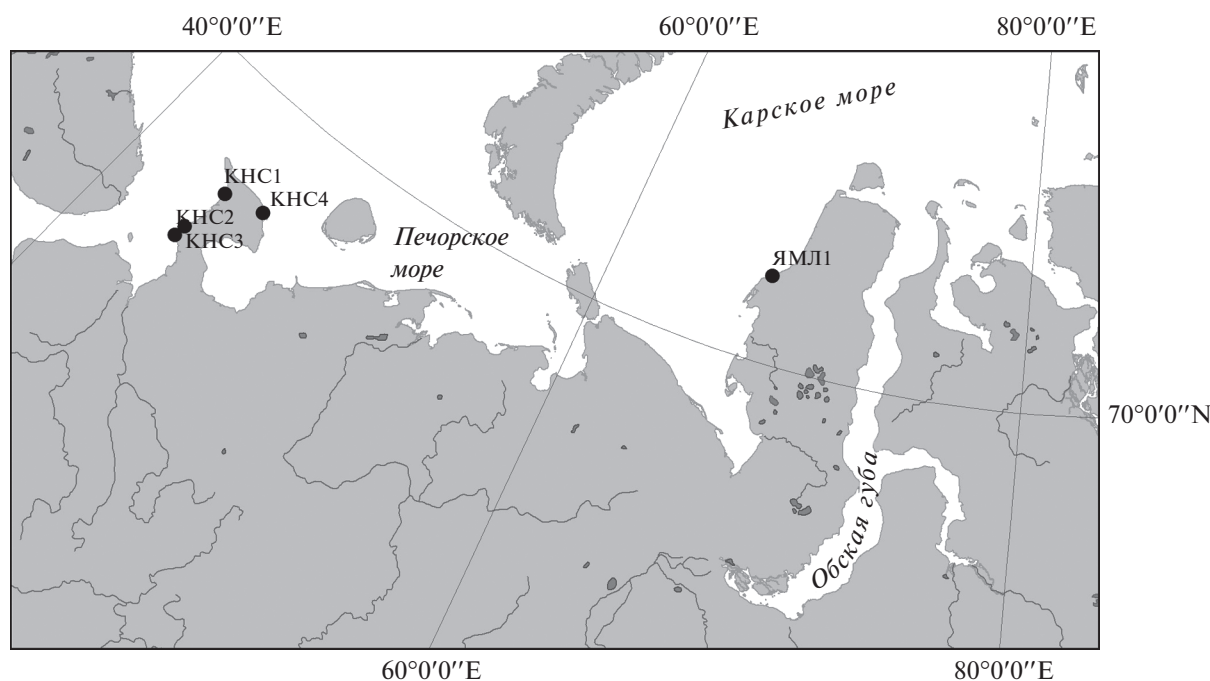


Рис. 2. Схема расположения ключевых участков.

ной системы ArcGIS. Полученные выборки сопоставлялись с различными теоретическими распределениями; сопоставление выполнялось с использованием критерия согласия хи-квадрат (критерия Пирсона) в программе Statistica.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Первым этапом решения поставленных задач стали формирование модели развития длин хорд в ходе оползневой процесса и получение результатов ее анализа.

Рассмотрим бесконечный прямолинейный склон длины  $L$  с постоянными однородными физико-географическими, геолого-геоморфологическими и геокриологическими условиями, развивающийся за счет рассматриваемых процессов. В качестве основного элемента границы рассматриваем дугу и соответствующую ей хорду.

Примем в качестве основания модели следующие допущения:

а) вероятность появления новых дуг (в количестве  $k = 1, 2, \dots$ ) за время  $\Delta t$  с центральной точкой на отрезке береговой линии  $\Delta l$  определяется только величинами временного интервала и отрезка<sup>1</sup>

$$p_1(\Delta l, \Delta t) = \lambda \Delta l \Delta t + o(\Delta l \Delta t) \text{ при } k = 1,$$

$$p_k(\Delta l, \Delta t) = o(\Delta l \Delta t), \quad k > 1;$$

<sup>1</sup> При этом вероятность появления более одного оползня (дуги) с центральной точкой на этом отрезке за этот же временной интервал много меньше, чем вероятность появления одного.

б) хорды дуг возникающих оползней имеют постоянное распределение  $F_0(x)$ .

Рассмотрим существующий оползень (1) с соответствующей дугой и хордой АВ. Оценим вероятность того, что за данный интервал  $\Delta t$  оползень не будет задет возникшим новым оползнем (2) с хордой CD с центральной точкой  $O_2$  (рис. 3).

Данная вероятность определяется вероятностью того, что расстояние  $O_2C$  от центральной точки до границы нового оползня (2) (обозначим его величину  $\xi_1$ ) будет меньше, чем расстояние  $O_2B$  до границы рассматриваемого существующего оползня (1). С учетом равновероятности положения центральной точки нового оползня на любом участке  $\Delta x$  береговой линии длины  $L$  (допущение модели "а") искомую вероятность получаем, перебирая все возможные положения центральной точки, интегрированием

$$\alpha = \int_0^L F_1(x) \frac{dx}{L},$$

где  $F_1(x)$  – распределение  $\xi_1$ ; оно очевидным образом связано с распределением длины хорды оползня (представляя собой ее половину).

Соответственно, вероятность того, что существующий оползень не будет задет новым оползнем равна

$$1 - \alpha = \frac{1}{L} \int_0^L (1 - F_1(x)) dx. \quad (1)$$

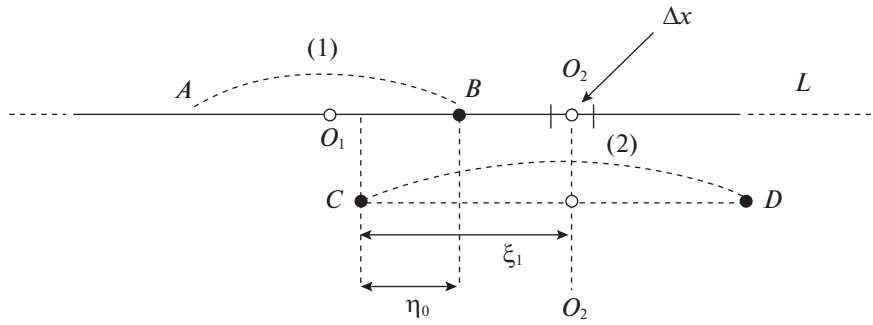


Рис. 3. Схема, поясняющая формирование морфологических особенностей оползневого склона (объяснения в тексте).

Оценим вероятность того, что рассматриваемый оползень не будет задет  $m$  новыми оползнями, возникшими за время  $u$ .

Из предположения модели (а) однозначно следует (см., например [2, 3]), что число  $\nu$  возникших новых оползней за время  $u$  на длине  $L$  отвечает распределению Пуассона

$$P_\nu(k) = \frac{(\lambda u L)^k}{k!} e^{-\lambda u L},$$

где  $\lambda$  – средняя плотность генерации оползней.

С учетом независимости событий, вероятность, что  $m$  из  $k$  оползней затронут рассматриваемый оползень (1), получаем с помощью числа сочетаний из  $k$  по  $m$

$$P_\mu^0(m|k) = \frac{k!}{m!(k-m)!} (1-\alpha)^m \alpha^{k-m} \frac{(\lambda u L)^k}{k!} e^{-\lambda u L},$$

и перебирая все возможные значения  $k$  ( $k \geq m$ ), получаем распределение числа задевших оползней  $\mu$ . После упрощения получаем

$$P_\mu^0(m) = \frac{[\lambda u(1-\alpha)L]^m}{m!} e^{-\lambda u(1-\alpha)L}.$$

Отказавшись от ограничения длины береговой линии, переходя к пределу  $L \rightarrow +\infty$ , с учетом (1) получаем

$$P_\mu(m) = \frac{(\lambda u M \xi_1)^m}{m!} e^{-\lambda u M \xi_1}, \quad (2)$$

где  $M \xi_1$  – половина средней длины хорды.

Отсюда, соответственно, вероятность того, что оползень за время  $u$  не будет задет другими более поздними оползнями, равна

$$P_\mu(0) = e^{-\lambda u M \xi_1}, \quad (3)$$

а вероятность того, что он будет задет (в том числе полностью стерт), составляет

$$1 - P_\mu(0) = 1 - e^{-\lambda u M \xi_1}. \quad (4)$$

Распределение величины стирания оползня ( $\eta$ ) за время  $u$ , т.е. распределение величины сокращения

хорды оползня за счет стирания более молодыми, возникшими позднее оползнями. Сначала оценим распределение величины стирания  $\eta_0$  рассматриваемого оползня (1) одним более молодым оползнем (2) при условии, что оползень (1) затронут стиранием, т.е.  $\eta_0 > 0$ . При этом величина стирания понимается как величина “захождения” границы С оползня (2) за границу В оползня (1), и не исключается его полное стирание (1) (см. рис. 3).

Исходя из допущения модели (а) и учитывая, что центральная точка оползня (2) с равной вероятностью может оказаться на любом отрезке одинаковой длины  $\Delta x$  на береговой линии  $L$ , после упрощения путем интегрирования можно определить распределение величины стирания  $F_{\eta_0}(y)$  при условии  $\eta_0 > 0$  как вероятность того, что половина длины хорды оползня (2) будет больше расстояния  $x$  от центральной точки  $O_2$  оползня (2) до границы оползня (1) точки В, но при этом меньше  $y$ :

$$F_{\eta_0}(y) = \frac{\int_0^L [F_1(y+x) - F_1(x)] \frac{dx}{L}}{\int_0^L [1 - F_1(x)] \frac{dx}{L}}.$$

Переходя к пределу при  $L \rightarrow \infty$  (т.е. при большой длине береговой линии), после упрощения получаем

$$F_{\eta_0}(y) = \frac{1}{M \xi_1} \int_0^y [1 - F_1(x)] dx. \quad (5)$$

Отсюда нетрудно получить соотношение для среднего значения величины стирания

$$M \eta_0 = \frac{1}{4} \frac{M^2 \xi_0}{M \xi_0},$$

где  $M \xi_0, M^2 \xi_0$  – математическое ожидание и момент второго порядка размеров хорды образовавшегося молодого оползня соответственно.

Получим распределение суммарной величины стирания  $\eta$  рассматриваемого оползня (1) возраста  $u$  до настоящего момента всеми задевшими его более молодыми, пока не принимая в расчет, был ли полностью стерт оползень (1) в какой-либо момент времени. В этом случае общее стирание отвечает сумме случайного числа стираний, независимых по допущениям модели, каждое из которых имеет распределение, отвечающее выражению (5). Учитывая, что число задевших оползней подчиняется распределению Пуассона (см. (2)), и вероятность того, что оползень за время  $u$  будет задет другими более поздними оползнями, получаем распределение суммарной величины стирания:

$$F_{\eta}(x, u) = \frac{e^{-\lambda u M \xi_1}}{1 - e^{-\lambda u M \xi_1}} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(\lambda u M \xi_1)^k}{k!} \prod_{\otimes}^m F_{\eta_0}(x),$$

где  $\prod_{\otimes}^m F_{\eta_0}(x)$  – свертка  $k$  одинаковых распределений  $F_{\eta_0}(x)$ .

*Распределение размера  $\tau$  хорды оползней, появившихся в интервале времени  $[0, T]$ , при условии, что оползень не стерт целиком.* Вероятность того, что оползень возраста  $u$  будет иметь размер хорды не больше заданного  $y$ , определяется, если:

- стирания не было, величиной  $F_0(y)$ ,
- стирание было, величиной

$$\int_0^{\infty} [F_0(y+x) - F_0(x)] f_{\eta}(x, t) dx,$$

где  $f_{\eta}(x, t)$  – плотность распределения суммарного стирания через время  $t$  после начала процесса.

Соответственно, учитывая:

- вероятность того, что оползень будет задет или не будет задет (см. (3) и (4)),
- одинаковую вероятность формирования оползня на каждом равном временном отрезке,
- условие, что оползень должен не быть стерт полностью,

после упрощения, интегрируя по времени, можно оценить искомое распределение размера  $\tau$  хорды оползня (безотносительно его возраста)

$$F_{\tau}(y) = \frac{F_0(y) + \int_0^{+\infty} [F_0(y+x) - F_0(x)] \left[ \sum_{k=1}^{+\infty} \prod_{\otimes}^k F_{\eta_0}(x) \right] dx}{1 + \int_0^{+\infty} [1 - F_0(x)] \left[ \sum_{k=1}^{+\infty} \prod_{\otimes}^k F_{\eta_0}(x) \right] dx}.$$

Используя аппарат характеристических функций, удалось показать, что распределение

$$F(x) = \frac{1}{k} \sum_{m=1}^k \prod_{\otimes}^m F_{\eta_0}(x) \quad \text{при } k \rightarrow +\infty$$

сходится к равномерному распределению.

Исходя из этого, после упрощения получаем следующее выражение, описывающее *взаимосвязь плотности распределения наблюдаемых размеров хорд и распределения размеров хорд вновь образующихся молодых оползней* при большом времени развития склона

$$f_{\tau}(y) = \frac{f_0(y) + \frac{4M\xi_0}{M^2\xi_0} [1 - F_0(y)]}{1 + \frac{4(M\xi_0)^2}{M^2\xi_0}}.$$

Следующим шагом явилась *оценка изменения средней плотности расположения оползней во времени.*

Оценим среднюю плотность расположения оползней в момент времени  $T$  после начала развития процесса на участке  $\gamma(T)$ . Ее величина определяется количеством появившихся оползней за время  $T$  и вероятностью каждого оползня не быть стерт к этому моменту. Учитывая равномерность (в среднем) генерации оползней во времени, после упрощения получаем

$$\gamma(T) = \int_0^T \left[ e^{-\lambda M \xi_1 t} + (1 - e^{-\lambda M \xi_1 t}) \int_0^T [1 - F_0(x)] f_{\eta}(x, t) dx \right] \lambda dt.$$

Переходя к пределу при  $T \rightarrow +\infty$  и интегрируя, получаем

$$\gamma(\infty) = \frac{1}{M \xi_1} \left[ 1 + \int_0^{+\infty} [1 - F_0(x)] \left[ \sum_{k=1}^{+\infty} \prod_{\otimes}^k F_{\eta_0}(x) \right] dx \right].$$

Используя ход рассуждений, аналогичный приведенному выше, формируем выражение для плотности расположения оползней через значительное время развития

$$\gamma(\infty) = \frac{2}{M \xi_0} \left[ 1 + \frac{4(M \xi_0)^2}{M^2 \xi_0} \right].$$

Таким образом, получен вывод, что при значительном времени развития средняя плотность расположения оползней вдоль береговой линии стабилизируется около некоторой конечной величины. Также стабилизируется и распределение наблюдаемых размеров хорд оползней, и устанавливается некоторое не меняющееся во времени их распределение. При этом обе характеристики не зависят от интенсивности генерации новых оползней  $\lambda$ , а только от распределения размеров образующихся молодых оползней.

Таким образом, можно констатировать, что в ландшафте абразионных берегов с развитием оползневых процессов устанавливается состояние динамического равновесия морфологической структуры данного ландшафта, по крайней мере, в отношении средней плотности располо-



**Таблица 1.** Результаты статистической обработки данных по выборкам длин хорд оползней на ключевых участках

| Участок | Объем выборки | Нормальное распределение |          |       | Логнормальное распределение |                    |       | Гамма-распределение |          |       |
|---------|---------------|--------------------------|----------|-------|-----------------------------|--------------------|-------|---------------------|----------|-------|
|         |               | среднее                  | стандарт | $p$   | среднее логарифма           | стандарт логарифма | $p$   | $\lambda$           | $\alpha$ | $p$   |
| КНС1    | 183           | 50.3                     | 43.2     | 0.000 | 3.675                       | 0.666              | 0.288 | 22.66               | 2.22     | 0.015 |
| КНС2    | 181           | 59.6                     | 43.0     | 0.000 | 3.881                       | 0.639              | 0.241 | 23.18               | 2.57     | 0.010 |
| КНС3    | 181           | 22.8                     | 15.1     | 0.000 | 2.951                       | 0.586              | 0.782 | 7.63                | 2.99     | 0.131 |
| КНС4    | 159           | 45.6                     | 27.1     | 0.000 | 3.678                       | 0.529              | 0.339 | 12.40               | 3.68     | 0.153 |
| ЯМЛ1    | 108           | 18.0                     | 11.3     | 0.000 | 2.751                       | 0.504              | 0.574 | 4.71                | 3.81     | 0.314 |

Примечание.  $\lambda$  – масштабный параметр,  $\alpha$  – параметр формы,  $p$  – параметр (разница эмпирического и теоретического распределений статистически значима на уровне 0.99 в случае  $p < 0.01$ ).

жения и протяженности оползней по простираю к береговой линии.

Вышеперечисленные результаты безусловно получены при определенных упрощающих предположениях о постоянстве климатических условий и однородности береговой линии в отношении развития оползневого процесса. Однако и в этом случае, с нашей точки зрения, они представляют определенный интерес как некоторый репер, по отношению к которому можно рассматривать различные осложнения условий.

На следующем этапе был проведен комплекс исследований по эмпирическому изучению распределения длин хорд оползней на конкретных участках, включающий получение выборок длин хорд для оползней каждого участка и их сопоставление с теоретическими распределениями для выявления характерных особенностей распределений<sup>2</sup>. Результаты статистической обработки по всем участкам приведены в табл. 1.

На различных ключевых участках средние размеры хорд оползневых дуг заметно отличаются (от 18 до 60 м), при этом наименьшие значения приходятся на Ямальский участок. На всех участках наблюдается значительный разброс значений, и среднее квадратическое отклонение составляет от 60 до 86% от среднего.

Анализ сходства эмпирических распределений длин хорд, стрелок, радиусов кривизны с различными видами теоретических распределений (нормальное, логнормальное, гамма-распределение и экспоненциальное) дает интересные результаты. На всех участках на уровне значимости 0.99 наблюдается один и тот же тип распределения – логнормальное. Это выполняется при зна-

чительной разнице значений параметров распределения. Гамма распределение также соответствует эмпирическим данным, но несколько хуже. Нормальное распределение не согласуется с эмпирическими данными ни на одном участке.

На рис. 4 показаны примеры соответствия эмпирических распределений и теоретических логнормальных распределений.

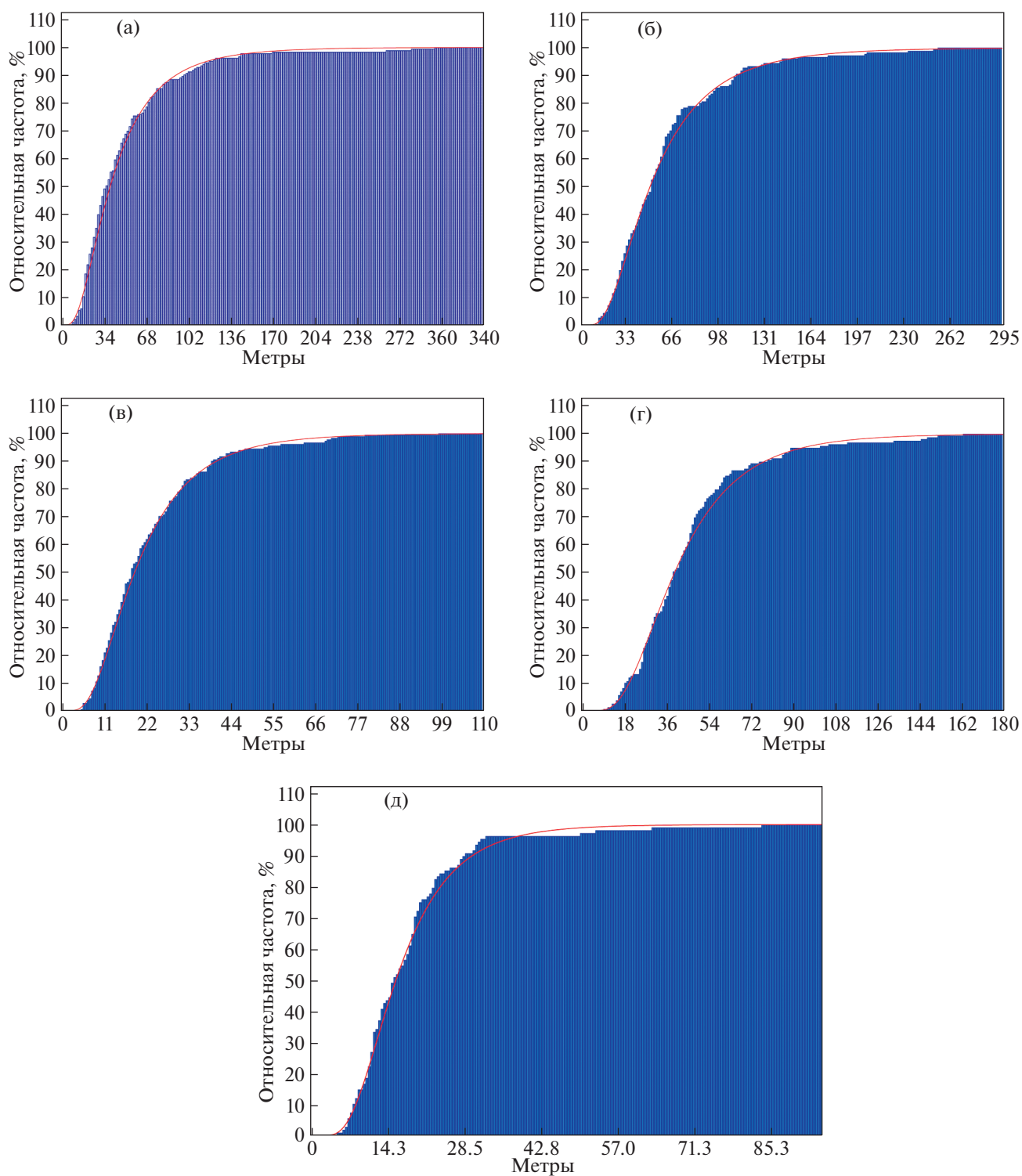
Таким образом, исследования реальных распределений длин хорд показывают их соответствие одному и тому же виду вероятностных распределений на всех участках, т.е. между морфологическими особенностями различных участков абразионных берегов с развитием оползневых процессов существует определенная общность, подтверждающаяся данными по 5 участкам полуостровов Канин нос и Ямал. На всех участках, находящихся в различных физико-географических и инженерно-геокриологических условиях, распределение размеров хорд отвечает логнормальному распределению. В то же время по значениям средних длин хорд Ямальский участок отличается от участков Канина носа. Это говорит о том, что физико-географические и инженерно-геокриологические условия, не оказывая сильного влияния на вид распределений, тем не менее, значительно влияют на значения параметров – средние длины хорд, разброс длин.

Близость к гамма-распределению возможно объясняется близостью самих распределений в определенном интервале значений параметров, это отмечалось в ряде работ [5].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование позволяет получить следующие выводы.

<sup>2</sup> Выполнено совместно с Т.В. Орловым, М.В. Архиповой, В.В. Бондарь.



**Рис. 4.** Соответствие эмпирических распределений (синий контур) и теоретических (красная линия) логнормальных распределений по ключевым участкам: а – КНС1, б – КНС2, в – КНС3, г – КНС4, д – ЯМЛ1.

Как показывает моделирование в условиях относительного однородного по геологическим и геокриологическим условиям абразивного склона, устанавливается динамическое равновесие,

которое проявляется в стабилизации средней плотности расположения оползней и стабилизации вероятностного распределения их размеров по простиранию склона.



Обоснована аналитическая зависимость между вероятностным распределением размеров хорд образующихся молодых оползней и вероятностным распределением хорд всех представленных оползней, в том числе частично стертых более поздними оползнями, а также между средней плотностью расположения оползней вдоль береговой линии и параметрами распределения размеров хорд образующихся молодых оползней.

Анализ эмпирических данных по полуострову Канин нос и Ямал показал соответствие распределений наблюдаемых длин хорд оползней абразионных склонов логнормальному распределению.

Полученные результаты могут быть использованы в различных аспектах. Так, одним из направлений использования могут быть оценка и моделирование процесса отступления берегов. Отступление бровки склона во многом определяется величиной стрелки дуги образующегося оползневом тела, а длина последней коррелирует, как показали исследования, с размерами хорды. Таким образом, модель, характеризующая формирование последовательности хорд, в значительной мере связана с моделированием отступления бровки.

Другое направление связано с исследованием размеров формирующихся оползней. Результаты настоящей работы позволяют по наблюдаемому распределению размеров хорд оценить размеры хорд формирующихся молодых оползней.

Безусловно, выполненная работа обладает рядом ограничений. Так, например, предполагается постоянство условий развития оползневых процессов, в частности климатических условий. Но

нам представляется, что, тем не менее, выполненное исследование является полезным шагом в изучении берегов с развитием оползневых процессов и может быть использовано при переходе к более сложным и совершенным моделям.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РНФ № 18-17-00226П.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белова Н.Г., Шабанова Н.Н., Огородов С.А., Камалов А.М. и др. Динамика термоабразионных берегов Карского моря в районе мыса Харасавэй (Западный Ямал) // Криосфера Земли. 2017. Т. 21. № 6. С. 85–96.
2. Викторов А.С. Математическая морфология ландшафта. М.: Тратек, 1998. 220 с.
3. Карлин С. Основы теории случайных процессов. М.: Мир, 1971. 536 с.
4. Новиков В.Н., Федорова Е.В. Разрушение берегов в юго-восточной части Баренцева моря // Вестник Московского университета. Сер. 5: география. 1989. № 1. С. 64–68.
5. Пузаченко Ю.Г. Математические методы в экологических и географических исследованиях. М.: Издательский центр "Академия", 2004. 416 с.
6. Aleksyutina D.M., Shabanova N.N., Kokin O.V., Vergun A.P. et al. Monitoring and modelling issues of the thermoabrasive coastal dynamics // In IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, 2018. № 193. № 012003.
7. Belova N.G., Novikova A.V., Günther F., Shabanova N.N. Spatiotemporal variability of coastal retreat rates at Western Yamal Peninsula, Russia, based on remotely sensed data // J. of Coastal Research. 2020. № 95. P. 367–371.

## MODELING MORPHOLOGICAL FEATURES OF ABRASION LANDSLIDE COASTS IN CRYOLITHOZONE

A. S. Victorov<sup>a,#</sup>

<sup>a</sup> *Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences, Ulanskii per. 13, str. 2, Moscow, 101000 Russia*

<sup>#</sup> *E-mail: vic\_as@mail.ru*

This research is aimed at the behavior analysis of quantitative morphological features at abrasion landslide coasts in cryolithozone and their empirical investigation. The research deals with the morphological pattern of the upper landslide segment. The arcs limiting the landslide body and their chords are the characteristic features of this part of landslide bodies at the border with the watershed. Five key sites at the Kanin Nos and Yamal peninsulas were studied. The analysis performed proved that the probabilistic distribution of chord lengths observed at each moment of time for the entire set of landslides differs from that of chord lengths for young landslides formed due to partial and complete erasure of landslide bodies. The results of mathematical modeling in relatively uniform abrasion slope in regards to their geology and permafrost reveal the state of dynamic balance, which is manifested in the stabilization of landslide average density and landslide size probabilistic distribution along the slope strike. The analytical relationship is obtained between the probability distribution of chord lengths for emerging young landslides and the probability distribution of chord lengths for all presented landslides, including those partially erased by later landslides, as well as between the landslide average density along the coastline and the chord length distribution parameters for the young landslides.

Empirical data analysis for the key sites demonstrates a lognormal distribution for all the measured chord lengths.

**Keywords:** *mathematical modeling of landslide morphological features, abrasion coasts, mathematical morphology of landscape, dynamic equilibrium of coasts*

#### REFERENCES

1. Belova, N.G., Shabanova, N.N., Ogorodov, S.A., Kamalov, A.M. et al. *Dinamika termoabrazionnykh beregov Karskogo morya v raione mysy Kharasavey (Zapadnyi Yamal)* [Dynamics of thermal abrasion coasts of the Kara Sea in the area of Cape Kharasavey (Western Yamal)]. *Kriosfera Zemli*, 2017, vol. 21, no. 6, pp. 85–96. (in Russian)
2. Viktorov, A.S. *Matematicheskaya morfologiya landshafta* [Mathematical morphology of the landscapes]. Moscow, Tratek Publ., 1998, 220 p. (in Russian)
3. Karlin, S. *Osnovy teorii sluchainykh protsessov* [Fundamentals of the theory of random processes]. Moscow, Mir Publ., 1971, 536 p. (in Russian)
4. Novikov, V.N., Fedorova, Ye.V. *Razrushenie beregov v yugo-vostochnoi chasti Barentseva morya* [Coastal destruction in the southeastern part of the Barents Sea]. *Vestnik Moskovskogo universiteta, Seriya 5: geografiya*, 1989, no. 1, pp. 64–68. (in Russian)
5. Puzachenko, Yu.G. *Matematicheskie metody v ekologicheskikh i geograficheskikh issledovaniyakh* [Mathematical methods in ecological and geographical research]. Moscow, Akademiya Publ., 2004, 416 p. (in Russian)
6. Aleksyutina, D.M., Shabanova, N.N., Kokin, O.V., Vergun, A.P. et al. Monitoring and modelling issues of the thermoabrasive coastal dynamics. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2018, no. 193, no. 012003.
7. Belova, N.G., Novikova, A.V., Günther, F., Shabanova, N.N. Spatiotemporal variability of coastal retreat rates at Western Yamal Peninsula, Russia, based on remotely sensed data. *J. of Coastal Research*, 2020, no. 95, pp. 367–371.

---

---

**ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОПРИРОДНЫЕ  
ПРОЦЕССЫ**

---

---

УДК 551.435.2

**ИНТЕГРАЛЬНАЯ ОЦЕНКА СУФФОЗИОННОЙ ОПАСНОСТИ  
ТЕРРИТОРИИ БУГУЛЬМИНСКОГО ПЛАТО БУГУЛЬМИНСКО-  
БЕЛЕБЕЕВСКОЙ ВОЗВЫШЕННОСТИ**© 2022 г. А. И. Латыпов<sup>1,\*</sup>, А. Н. Гараева<sup>1,\*</sup>, О. В. Лунева<sup>1,\*</sup>, Э. А. Королев<sup>1,\*</sup><sup>1</sup> Казанский (Приволжский) федеральный университет,  
ул. Кремлевская, 4/5, Казань, 420008 Россия

\*E-mail: airatlat@mail.ru

Поступила в редакцию 16.09.2022 г.

После доработки 28.09.2022 г.

Принята к публикации 01.10.2022 г.

Работа посвящена изучению территории Бугульминского плато, расположенной в юго-восточной части Республики Татарстан. Авторами предложен подход к оценке суффозионной опасности, основанный на интегральной оценке суффозионности бесструктурных элювиальных грунтов и параметров трещиноватости структурного элювия. На основании выделения литологических разновидностей грунтов, математических расчетов и экспериментальных исследований выполнено районирование исследуемой территории по степени суффозионной опасности с построением тематических карт в среде ArcMap 10.8. Полученные результаты будут полезны как для принятия предварительных проектных решений на незастроенных территориях, так и для прогноза развития неблагоприятных инженерно-геологических процессов на участках существующих зданий и сооружений.

**Ключевые слова:** суффозионная неустойчивость, элювий, карбонатный грунт, кора выветривания, трещиноватость

**DOI:** 10.31857/S0869780922060066**ВВЕДЕНИЕ**

Элювиальные отложения, формирующие молодые коры выветривания, в последнее время вызывают повышенный интерес у геологов различной прикладной направленности. Это связано, с одной стороны, с наличием в них полезных ископаемых, с другой – с использованием их в качестве оснований инженерных сооружений. С последним случаем связано изучение территории Бугульминского плато Бугульминско-Белебеевской возвышенности, расположенной в юго-восточной части Республики Татарстан (РТ).

Бугульминско-Белебеевская возвышенность полностью сложена осадочными породами пермского возраста, среди которых преобладают песчаники, известняки и доломиты казанского яруса. Отдельные вершины останцев сложены красноцветными глинами, мергелями, доломитами и песчаниками уржумского яруса. Более молодые отложения на возвышенностях отсутствуют, за исключением плиоцен-четвертичных пролювиальных и делювиальных шлейфов, а также почвенного покрова. Элювиальные грунты на исследуемой территории широко распространены и встречаются практически повсеместно.

Элювиальные грунты зоны гипергенеза обладают высокой степенью структурной неоднородности, склонностью к механической и химической суффозии, характеризуются снижением прочности и увеличением сжимаемости при водонасыщении, дроблением крупнообломочных частиц элювия под воздействием строительных нагрузок от некоторых сооружений, что, согласно СП 22.13330.2016, обуславливает их принадлежность к категории специфических грунтов, требующих дополнительных инженерно-геологических исследований. На исследуемой территории преимущественно распространены карбонатные элювиальные грунты, повсеместно выходящие на дневную поверхность и часто являющиеся основанием фундаментов зданий и сооружений.

Территория Бугульминского плато характеризуется высокой антропогенной нагрузкой. На этой части РТ расположено несколько крупных городов, разрабатываются крупнейшие месторождения нефти (Ромашкинское, Ново-Елховское, Шугуровское), функционируют промышленные заводы и объекты химической, нефтяной и сельскохозяйственной промышленности. При этом инженерно-геологическая изученность ис-

следуемой территории значительно уступает восточной и центральной частям РТ, до настоящего времени малоизвестно об особенностях распространения элювиальных отложений в карбонатных массивах, слабо изучено их строение, степень выветрелости пород и изменение физико-механических свойств по разрезу.

Техногенное освоение территорий способствует значительной активизации природных и техно-природных процессов. Тектоника территории, рельеф и его расчлененность, гипсометрическое положение пород относительно базиса эрозии, состав, структурно-текстурные особенности горных пород, их трещиноватость, раздробленность, гидрогеологические условия, климат создали благоприятные условия для проникновения агентов выветривания и образования элювиальных грунтов на изучаемой территории, а также развития неблагоприятных экзогенных процессов, таких как суффозия и карст.

Изученность карстово-суффозионных процессов на исследуемой территории довольно низкая. Серьезные исследования отражены в работах [2, 4], которые, тем не менее, посвящены преимущественно оценке карстовой опасности, мало затрагивая вопросы, связанные с оценкой суффозионных процессов. Вместе с тем наблюдения показывают, что в рельефе исследуемой территории преобладают именно суффозионные формы.

Изучению суффозионных процессов, развивающихся в элювиальных грунтах, посвящено много работ [11–16]. Основным теоретическим аспектам часто посвящены отдельные главы монографий [1, 3]. Недостатком большинства исследований является то, что процессы суффозии изучаются либо в рамках решения конкретной узкой практической задачи с применением расчетов по существующим методикам, например, [6, 7], либо на основании совместного учета действия наиболее существенных факторов развития неблагоприятных процессов [9, 10].

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Первый этап исследований включал в себя анализ имеющихся материалов, таких как космоснимки, топографические планы, материалы инженерных изысканий. Для первичного поиска характерных форм рельефа использовался программный комплекс SASPlanet, позволяющий достаточно уверенно диагностировать деформации рельефа диаметром более 3 м.

Второй этап заключался в рекогносцировочном маршрутном обследовании изучаемой территории с изучением литологического строения элювиальных карбонатных грунтов во вскрытых разрезах зоны гипергенеза. Активно исследова-

лись как существующие, так и недействующие карьеры добычи карбонатных пород, обнажения, шурфы и расчистки. Все горные выработки подвергались детальному описанию, фотодокументации и отбору образцов для дальнейших лабораторных исследований. В общей сложности обследована 201 точка наблюдения, расположение которых показано на геоморфологической карте (рис. 1).

На третьем этапе были проведены лабораторные исследования грунтов. Для бесструктурного элювия, представленного преимущественно карбонатной мукой с различной степенью включений дресвы и щебня, определялись гранулометрический состав и параметры физического состояния.

Структурный элювий оценивался как по прочности слагающих его горных пород, так и его трещиноватости. За методическую основу исследований суффозионной устойчивости были приняты известные методики ВНИИГ [6, 7], согласно которым массив грунта рассматривается одновременно и как дисперсная среда, и как трещиноватый массив. Для дисперсной части элювия (карбонатной муки преимущественно с включениями дресвы и щебня) основой расчета на суффозионность являются параметры, вычисляемые на основании тех или иных характеристик гранулометрического состава.

Согласно [7], несуффозионность грунта считается обеспеченной, когда из его толщи при любых скоростях фильтрации не будет происходить выноса самых мелких частиц ( $d_{\min}$ ). Частицы грунта, имеющие меньшие размеры, чем диаметр наибольшего фильтрационного хода в грунте ( $d_{ci}^{\max}$ ), называются суффозионными, так как могут быть вынесены фильтрационным потоком из грунта.

При выполнении условия

$$d_{ci}^{\max} = 0.77d_0^{\max} > d_{\min}, \quad (1)$$

грунт следует считать суффозионным; из такого грунта могут выноситься все частицы, крупность которых меньше или равна диаметру суффозионных частиц ( $d_{ci}$ ).

При выполнении условия

$$d_{ci}^{\max} = 0.77d_0^{\max} < d_{\min}, \quad (2)$$

грунт следует считать несуффозионным. Из такого грунта не могут выноситься и самые мелкие его частицы –  $d_{3\%}, d_{5\%}$  [7].

Диаметр максимального фильтрационного хода определяется следующими зависимостями (с учетом сегрегации грунта):

$$d_0^{\max} = xC \frac{n}{1-n} d_{17}, \quad (3)$$

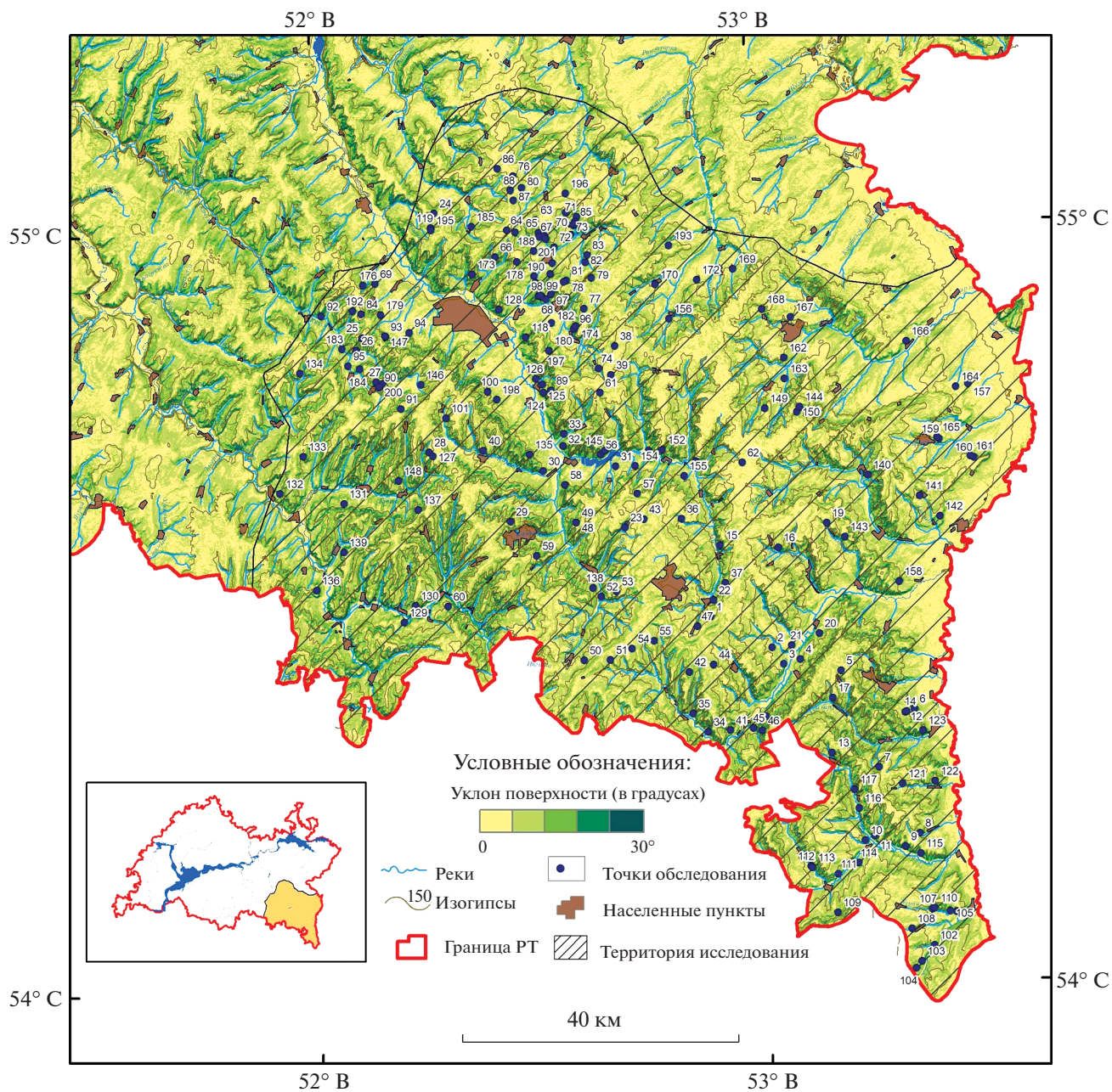


Рис. 1. Геоморфологическая карта территории Бугульминского плато с точками обследования.

где  $x$  – коэффициент неравномерности раскладки частиц в грунте, или коэффициент локальности суффозии. Параметр  $C$  определяется по формуле:

$$C = 0.46\sqrt[6]{C_u} \tag{4}$$

Коэффициент  $x$  зависит главным образом от коэффициента разноразмерности грунта  $C_u$ . С некоторым запасом можно принять:

а) для гранулометрического состава грунтов с  $C_u \leq 25$

$$x = 1 + 0.05C_u, \tag{5}$$

б) для гранулометрического состава грунтов с  $C_u > 25$

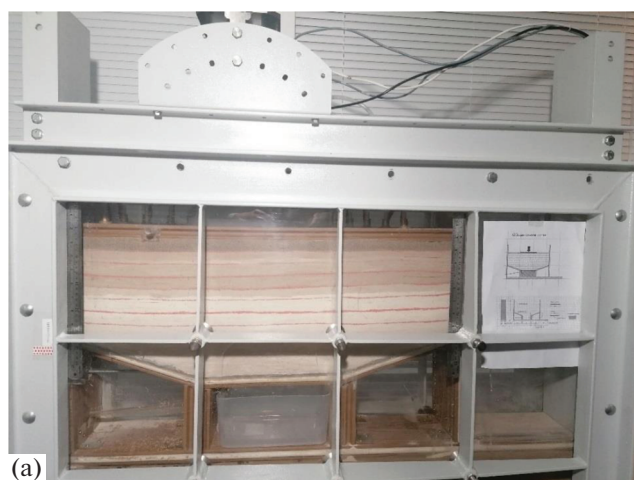
$$x = 0.35(2 + \sqrt{C_u}), \tag{6}$$

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \tag{7}$$

Другим критерием несущей способности грунта является выполнение условия:

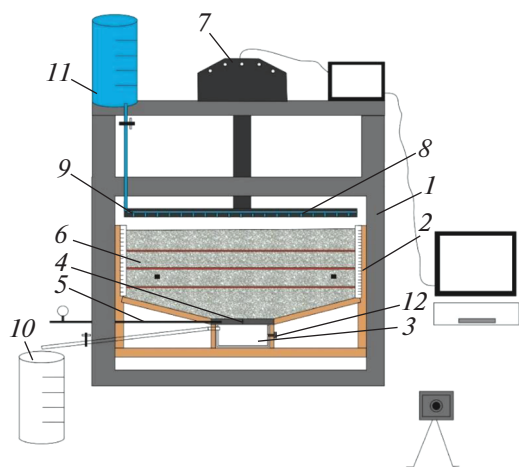
$$\frac{d_{5\%}}{d_{17\%}} \geq N, \tag{8}$$





(a)

(б)



**Рис. 2.** Внешний вид (а) и схема (б) устройства для определения суффозионной устойчивости грунтов: 1 – рабочая прозрачная камера; 2 – суффозионный лоток; 3 – прозрачный грунтосорбник; 4 – раздвижная полая щель; 5 – регулятор раскрытия щели; 6 – исследуемый грунт; 7 – электромеханическое вертикальное нагружающее устройство; 8 – нагруженный штамп; 9 – система капельного полива; 10 – мерная емкость; 11 – напорный бак; 12 – датчик мутности.

где

$$N = 0.10\sqrt[3]{C_u}(2 + \sqrt{C_u})\frac{n}{1-n}. \quad (9)$$

Физический смысл условия (8) заключается в предположении, что устойчивость грунта практически не нарушается, если вынос самых мелких частиц будет менее 3–5% по массе.

Зона развития структурного элювия на территории Бугульминского плато по всем признакам приурочена к скальным грунтам трещиноватых массивов. В таких грунтах при расчете суффозионности преобладающее значение имеют параметры трещиноватости массива. Во время поле-

вого маршрутного обследования на характерных участках были заложены, описаны и задокументированы площадки трещиноватости для расчета геометрических параметров трещин, размеров отдельных и т.п. Основные результаты измерений опубликованы в более ранних работах авторов [5].

Недостатком вышеописанного расчетного способа является то, что в реальных условиях процесс суффозии может иметь быстро затухающий характер. Это может происходить как за счет отсутствия условий для транспортировки продуктов суффозии, так и за счет явления кольматации, поэтому важным является вопрос определения критических параметров трещин для каждой разновидности гранулометрического состава дисперсной части элювия. Для решения этой задачи авторами были проведены экспериментальные исследования на установке собственной разработки (патент № 2022110200 от 15.04.2022 “Устройство для определения суффозионной устойчивости и деформационных свойств грунтов и способ его использования”), показанной на рис. 2. Отличием установки от аналогичных является то, что моделирование процесса суффозии на трещиноватом скальном массиве производится в экспериментальном лотке больших размеров (1 × 1 × 0.25 м), в нижней части которого имеется раздвижная полая щель с возможностью плавного изменения ширины ее раскрытия в процессе эксперимента без прерывания процесса фильтрации. Управление нагружением вертикальной сжимающей нагрузкой, измерение деформаций осуществляется с помощью системы АСИС конструкции Научно-производственного предприятия “Геотек”.

Прозрачные стенки камеры позволяют визуально наблюдать характер протекания процесса суффозии. Момент начала суффозионного выноса грунта, его остановка вследствие кольматации и дальнейшее возобновление при достижении критического размера ширины раскрытия щели дополнительно контролируются в автоматическом режиме с помощью проточного датчика мутности.

Возможность создания вертикальной сжимающей нагрузки позволяет оценивать протекание процесса суффозии как в условиях природного напряженного состояния, так и при прогнозном нагружении.

Таким образом, в процессе эксперимента для грунтов различного гранулометрического состава имеется возможность инструментальной фиксации двух величин – начальной ширины раскрытия трещины  $t_0$ , соответствующей активизации суффозионного выноса самых мелких частиц, и критической ширины раскрытия  $t_{cr}$ , при дости-

жении которой процесс суффозии приобретает незатухающий характер.

На заключительном этапе исследований выполнялась камеральная обработка полученных материалов и была построена серия тематических карт в программной среде ArcMap 10.8. Топографической основой послужили электронная топографическая карта территории Республики Татарстан масштаба 1:200 000 и цифровая модель рельефа EarthExplorer.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ результатов полевых и лабораторных исследований показал, что в пределах Бугульминского плато Бугульминско-Белебеевской возвышенности широко распространены коры выветривания в начальной стадии формирования. Подробное описание литологического строения, условий формирования и преобразования, распространенности в плане и по глубине приведено в более ранней работе авторов [5].

Резюмируя основные полученные результаты, отметим, что на исследуемой территории можно выделить разновидности элювиальных грунтов.

1. *Бесструктурный элювий* – сложен разобщенными плиточками карбонатных пород, разориентированными по отношению друг к другу, размеры которых уменьшаются снизу вверх по разрезу молодой коры выветривания (рис. 3а). Мощность горизонта составляет от 0.3 до 0.6 м. В бесструктурном элювии можно выделить слой карбонатной муки (рис. 3б), характеризующийся рыхлым сложением, светло-серой окраской, преимущественно тонкозернистой структурой и однородной текстурой. В тонкозернистом слабосцементированном материале присутствуют разобщенные угловатые обломки исходных карбонатных пород. Дресва распределена неравномерно, снизу вверх наблюдается тенденция уменьшения количества крупнообломочного материала. Мощность слоя карбонатной муки варьирует от 0.3 до 0.8 м.

2. *Структурный элювий* – сложен плотными, слабо трещиноватыми известняками, с преобладанием в составе микрозернистого кальцита. Снизу вверх по разрезу последовательно увеличивается количество пересекающихся трещин, возрастает степень их раскрытия, в полостях разрывных нарушений появляется тонкодисперсный карбонатный материал. Соответственно, снизу вверх уменьшаются размеры блоков отдельностей с блочной параллелепипедной до грубо-, толсто- и среднеплитчатой. Мощность слоя варьирует от 0.5 до 2.8 м.

Обе литологические разновидности встречаются на выположенных вершинах эрозионно-денудационных останцев почти на всех водосбор-



(a)



(б)

Рис. 3. обнажения карбонатных пород у п. Райлан в Бугульминском районе и у п. Бакалы в Бавлинском районе Республики Татарстан (контакты зоны бесструктурного и структурного элювия).

ных бассейнах, приуроченных к элювиальным и элювиально-делювиальным отложениям. Часто присутствует неполный профиль молодой коры выветривания с присутствием только небольшого слоя бесструктурного элювия за счет постоянного сноса выветрелого обломочного материала [5].

Как было описано выше, для расчета суффозионности грунтов бесструктурного элювия была использована методика ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева [6, 7]. Результаты изучения 201 гранулометрического состава грунтов бесструктурного элювия позволили выделить 15 разновидностей гранулометрического состава по коэффициенту неоднородности. В табл. 1 приведены осредненные результаты обработки параметров гранулометрического состава и рассчитываемых на их основе величин.

Видно, что условие (8) выполняется для грунтов с коэффициентом неоднородности  $C_u < 8$ . Диапазон  $C_u$  8–10 можно считать переходным между суффозионно-устойчивыми и суффозионно-неустойчивыми грунтами. Это хорошо корре-

**Таблица 1.** Результаты определений параметров суффозионной опасности бесструктурного элювия

| $C_u$     | Размер частиц $d$ , мм |          |          |          | $d_5/d_{17}$ | $N$  | $C$  | $d_0^{\max}$ , мм | $d_{ci}^{\max}$ , мм | $t_0$ , мм | $t_{cr}$ , мм |
|-----------|------------------------|----------|----------|----------|--------------|------|------|-------------------|----------------------|------------|---------------|
|           | $d_5$                  | $d_{10}$ | $d_{17}$ | $d_{60}$ |              |      |      |                   |                      |            |               |
| 0.0–2.0   | 0.15                   | 0.17     | 0.23     | 0.33     | 0.66         | 0.03 | 0.15 | 0.04              | 0.03                 | 0.1        | 0.4           |
| 2.0–4.0   | 0.11                   | 0.12     | 0.15     | 0.38     | 0.70         | 0.05 | 0.24 | 0.05              | 0.04                 | 0.1        | 0.4           |
| 4.0–6.0   | 0.08                   | 0.12     | 0.19     | 0.64     | 0.41         | 0.09 | 0.41 | 0.13              | 0.10                 | 0.2        | 0.4           |
| 6.0–8.0   | 0.18                   | 0.21     | 0.25     | 1.60     | 0.72         | 0.13 | 0.31 | 0.24              | 0.20                 | 0.2        | 0.4           |
| 8.0–10.0  | 0.03                   | 0.11     | 0.16     | 1.50     | 0.19         | 0.27 | 1.02 | 0.53              | 0.44                 | 0.4        | 1.0           |
| 10.0–12.0 | 0.05                   | 0.12     | 0.18     | 1.70     | 0.29         | 0.29 | 1.09 | 0.64              | 0.49                 | 0.5        | 1.1           |
| 12.0–14.0 | 0.04                   | 0.12     | 0.14     | 2.00     | 0.29         | 0.36 | 1.20 | 0.67              | 0.51                 | 0.5        | 1.2           |
| 14.0–16.0 | 0.03                   | 0.08     | 0.10     | 1.50     | 0.30         | 0.42 | 1.44 | 0.59              | 0.46                 | 0.6        | 1.4           |
| 16.0–18.0 | 0.03                   | 0.07     | 0.11     | 1.65     | 0.27         | 0.59 | 1.81 | 1.00              | 0.77                 | 0.7        | 1.3           |
| 18.0–20.0 | 0.03                   | 0.10     | 0.11     | 2.80     | 0.27         | 0.76 | 2.15 | 1.25              | 0.95                 | 0.9        | 1.4           |
| 20.0–22.0 | 0.10                   | 0.13     | 0.20     | 2.80     | 0.49         | 0.52 | 1.65 | 1.53              | 1.18                 | 0.9        | 2.0           |
| 22.0–24.0 | 0.10                   | 0.16     | 0.25     | 3.10     | 0.40         | 0.44 | 1.49 | 1.58              | 1.21                 | 1.1        | 2.1           |
| 24.0–26.0 | 0.03                   | 0.13     | 0.15     | 3.50     | 0.20         | 0.72 | 2.06 | 1.70              | 1.30                 | 1.2        | 2.0           |
| 26.0–28.0 | 0.10                   | 0.14     | 0.16     | 4.00     | 0.63         | 0.78 | 2.19 | 2.07              | 1.60                 | 1.5        | 2.2           |
| 28.0–30.0 | 0.08                   | 0.16     | 0.18     | 4.7      | 0.44         | 0.82 | 2.25 | 2.46              | 1.89                 | 1.5        | 2.4           |

**Таблица 2.** Результаты полевых исследований трещиноватости структурного элювия

| Степень трещиноватости  | Количество площадок трещиноватости, шт | Модуль трещиноватости, М, % | Коэффициент трещинной пустотности, Ктп, % | Ширина раскрытия трещин, $t$ , мм |
|-------------------------|--|-----------------------------|---|-----------------------------------|
| Очень слаботрещиноватые | 39                                     | <1.5                        | 0.0–0.09                                  | 0.01–0.48                         |
| Слаботрещиноватые       | 51                                     | 1.5–5                       | 0.1–0.5                                   | 0.1–1.0                           |
| Среднетрещиноватые      | 55                                     | 5–10                        | 0.6–2.1                                   | 0.5–2.5                           |
| Сильнотрещиноватые      | 37                                     | 10–30                       | 2.2–3.5                                   | 0.5–4.5                           |

лирует и с результатами лабораторных исследований в экспериментальной установке. Для грунтов с  $C_u > 8$  наблюдается более чем двукратный рост значения как начальной ширины раскрытия трещины  $t_0$ , так и критической ширины раскрытия  $t_{cr}$ .

Как можно видеть из табл. 1, для этого диапазона также характерно резкое изменение диаметра наибольшего фильтрационного хода в грунте  $d_{ci}^{\max}$  с 0.20 в предыдущем диапазоне до 0.44, но для грунтов с  $C_u$  до 16 это изменение незначительно. А для грунтов с  $C_u$  от 16 до 30 параметр  $d_{ci}^{\max}$  отличается от значений в диапазоне 10–16 в 2–4 раза.

Существенное изменение критической ширины раскрытия трещины  $t_{cr}$  наблюдается лишь для грунтов с  $C_u > 20$ . Для таких грунтов, по всей видимости, суффозионность должна оцениваться по формулам, отличным от предлагаемых в существующих методиках.

На основании полученных данных было выполнено районирование территории Бугульминского плато по коэффициенту неоднородности в среде ArcMap 10.8.

На этапе полевых исследований в различных частях исследуемой территории были заложены и изучены 182 площадки трещиноватости. На основании полученных материалов все результаты были объединены в группы по степени трещиноватости согласно ГОСТ 25100–2020. Результаты исследований представлены в табл. 2.

Это позволило в первом приближении выполнить районирование исследуемой территории по степени трещиноватости пород структурного элювия.

На основании объединенных данных полевых и лабораторных исследований, выполненных расчетов и результатов моделирования была построена интегральная карта суффозионной опасности территории Бугульминского плато (рис. 4),



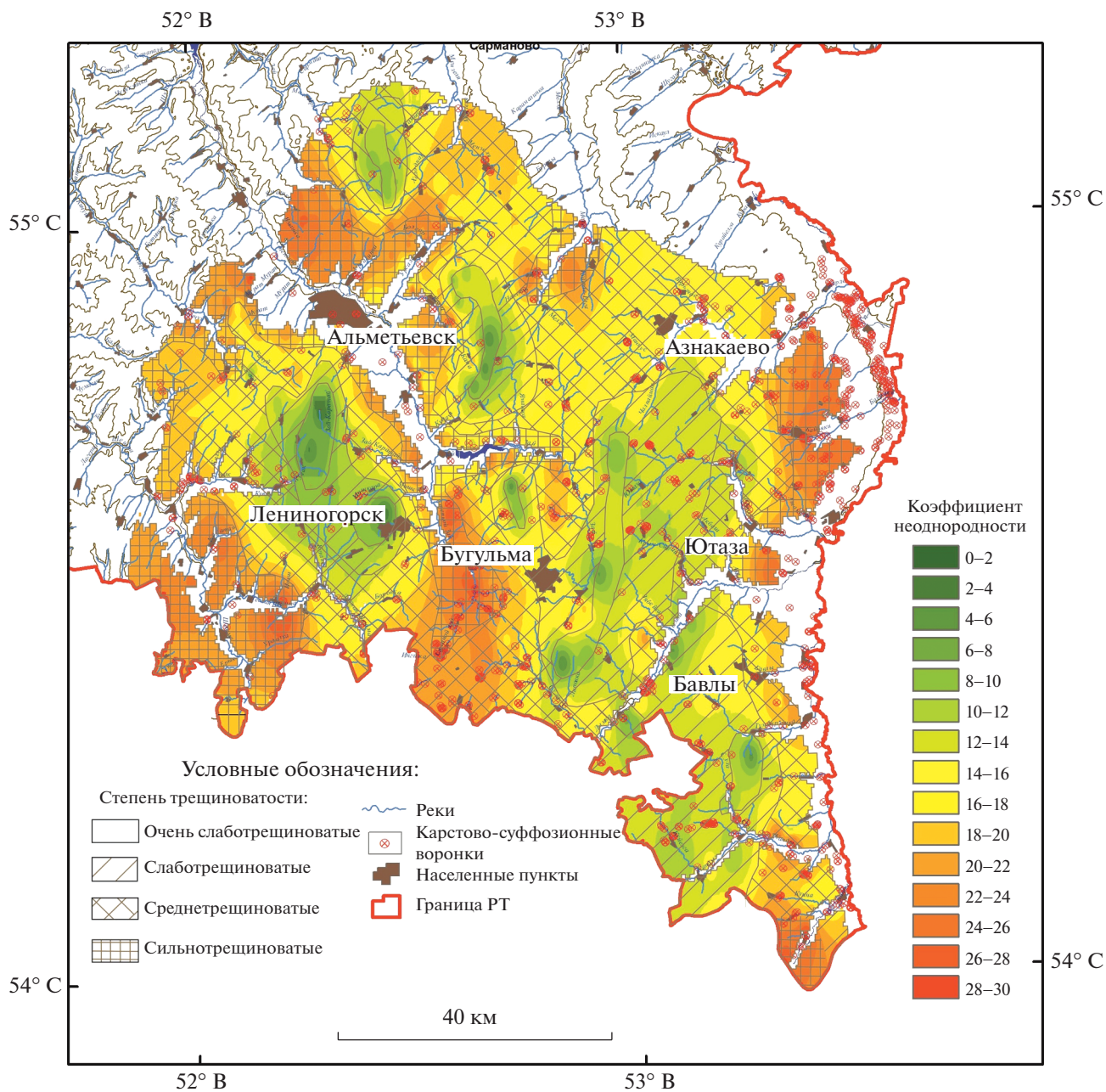


Рис. 4. Интегральная карта суффозионной опасности на территории Бугульминского плато.

учитывающая как суффозионную неустойчивость грунтов бесструктурного элювия, так и трещиноватость подстилающего структурного элювия.

На карту были нанесены точки выявленных при обследовании карстово-суффозионных форм рельефа. Необходимо отметить, что несмотря на различную природу протекания карстовых и суффозионных процессов, все обнаруженные деформации поверхности были объединены в общую группу. Это связано, во-первых, с трудностью их разделения на отдельные виды, особенно у старых форм, во-вторых – с частой взаимосвязанностью карстовых и суффозионных процессов.

Анализ полученной интегральной карты позволил сделать следующие заключения.

Наибольшая суффозионная опасность развита на эрозионно-аккумулятивных нижних, средних частях склонов вдоль крупных рек Шешма, Кичуй, Степной Зай, Ик, Мелля, Дымка. Участок характеризуется высокими значениями неоднородности грунта бесструктурного элювия ( $C_u$  – 19–30), а карбонатные породы структурного элювия по степени трещиноватости можно отнести к средне- и сильнотрещиноватым. Воронки на этих участках часто имеют провальный тип, а их диа-

метр достигает 10 м и более, поэтому можно говорить об одновременном протекании карстовых и суффозионных процессов на этих участках. Этот вывод хорошо соотносится с построенной интегральной картой. Данные участки характеризуются одновременно и высокими значениями коэффициентов неоднородности, и высокой степенью трещиноватости (участки красной заливки и плотной штриховки).

Наименьшая суффозионная опасность присуща эрозионно-денудационным водоразделам с наивысшими абсолютными отметками поверхности, в междуречьях рек Шешма и Степной Зай, рек Степной Зай и Мелля, рек Степной Зай, Ик и Дымка, рек Дымка Ик и Киндыз. Территория характеризуется низкими значениями неоднородности грунта бесструктурного элювия ( $C_u - 0-10$ ), а карбонатные породы структурного элювия по степени трещиноватости можно отнести к очень слаботрешиноватым. На интегральной карте эти участки соответствуют зонам зеленой заливки с отсутствием штриховки. При этом мощность элювия на этих участках достигает 6 м, однако проявления суффозионных и карстово-суффозионных процессов практически отсутствуют.

На других участках увеличение количества воронок соответствует увеличению коэффициента неоднородности бесструктурного элювия и трещиноватости пород структурного элювия.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

Суффозионная опасность территории Бугульминского плато Бугульмино-Белебеевской возвышенности, несмотря на высокую антропогенную нагрузку и высокую степень пораженности карстово-суффозионными формами рельефа, на настоящий момент является практически неизученной.

Результаты исследований показали, что на изучаемой территории коры выветривания сложены преимущественно карбонатными элювиальными грунтами, представленными разновидностями как структурного, так и бесструктурного элювия.

Подход к оценке суффозионной опасности, основанный на интегральной оценке ряда параметров суффозионности бесструктурных элювиальных грунтов и параметров трещиноватости структурного элювия, представляется перспективным для полноты учета большинства определяющих факторов.

Выполненное районирование территории Бугульминского плато может быть полезным при градостроительном планировании, выполнении инженерно-геологических изысканий и мониторинга за развитием карстово-суффозионных процессов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Аверьянов В.И., Блудорова Е.А., Фомичева Н.Л., Ясенов П.Г.* Казанское Поволжье и Прикамье // Плиоцен и плейстоцен Волго-Уральской области. 1981. М.: Наука, С. 95–118.
2. *Аникеев А.В., Чумаченко С.А.* Карстово-суффозионные провалы Бугульминско-Белебеевской возвышенности // Геоморфология. 2011. № 3. С. 32–41.
3. *Бондарик Г.К., Пендин В.В., Ярз Л.А.* Инженерная геодинамика. М: КДУ, 2007. 440 с.
4. *Елкин В.А.* Оценка карстовой опасности при инженерных изысканиях: обзор российских нормативных технических документов // Инженерные изыскания. 2018. № 11–12. С. 12–24.
5. *Латыпов А.И., Гараева А.Н., Лулева О.В.* Характеристика суффозионной опасности территории Бугульминского плато Бугульминско-Белебеевской возвышенности // Грунтоведение. 2022. № 1 (18). С. 31–43.
6. П 49–90 (ВНИИГ). Рекомендации по методике лабораторных испытаний грунтов на водопроницаемость и суффозионную устойчивость. Ленинград: ВНИИГ им. В.Е. Веденеева, 1991. URL: <https://law.rufox.ru/view/9/19491.htm>.
7. П 56–90 (ВНИИГ). Рекомендации по проектированию обратных фильтров гидротехнических сооружений. СПб: ВНИИГ им. В.Е. Веденеева, 1992. URL: <https://normacs.net/Doclist/doc/11FL0.html>
8. *Рагозин А.Л.* Региональная оценка карстовой опасности и риска // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2003. № 4. С. 33–52.
9. *Строкова Л.А., Епифанова Е.А.* Оценка суффозионной опасности территории пос. Сабетта (полуостров Ямал) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2021. Т. 332. № 7. С. 95–106.
10. *Строкова Л.А., Леонова А.В.* Оценка суффозионной опасности на территории г. Томска // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2021. Т. 332. № 5. С. 49–59.
11. *Хоменко В.П.* Закономерности и прогноз суффозионных процессов. М: ГЕОС, 2003. 216 с.
12. *Derakhshan-Babaei F., Nosrati K., Tihomirov D. et al.* Relating the spatial variability of chemical weathering and erosion to geological and topographical zones // Geomorphology. 2020. P. 363.
13. *Dong X., Cohen M., Martin J. et al.* Ecohydrologic processes and soil thickness feedbacks control limestone-weathering rates in a karst Landscape // Chemical Geology 2019. V. 527. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMGEO.2018.05.021>
14. *Latypov A., Zharkova N., Mouraviev F.* Dispersed weathering products of carbonate rock: Features and formation conditions from the construction's point of view (by the example of Kazan, Russia) // Proc. of the Int. symp. and 9th Asian regional conference of IAEG "Global View of Engineering Geology and the Environmental", Beijing, China. 2013. P. 891–896.

15. Meyer N., Kuhwald M., Petersen J. et al. Soil development in weathering pits of a granitic dome (Enchanted Rock) in central Texas // *Catena*. 2021. V. 199. № 105084. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.105084>
16. Startsev A. Soils on eluvium of Permian carbonate deposits and the change in their chemical properties under the influence of bog formation // *Moscow University soil science bulletin*. 1985. V. 40. № 3. P. 1–7.

## INTEGRAL ASSESSMENT OF THE SUFFUSION HAZARD AT THE BUGULMA PLATEAU, THE BUGULMA-BELEBEY UPLAND

A. I. Latypov<sup>a,#</sup>, A. N. Garaeva<sup>a,#</sup>, O. V. Luneva<sup>a,#</sup>, and E. A. Korolev<sup>a,#</sup>

<sup>a</sup> Kazan Federal University,  
Kremlyovskaya ul., 18, Kazan, 420008 Russia

<sup>#</sup>E-mail: [airatlat@mail.ru](mailto:airatlat@mail.ru)

This paper deals with the study of the Bugulma plateau located in the southeast of the Tatarstan Republic. The suffusion hazard was assessed using an integral estimation of suffusion properties of incoherent eluvial soils and the parameters of structural eluvium fracturing. Using lithological varieties of soils, mathematical calculations and experimental studies, the territory zoning was carried out according to the suffusion hazard degree and the thematic maps were built in the ArcMap 10.8. The results of this study are useful for making preliminary design decisions in undeveloped areas, as well as for predicting the development of unfavorable engineering and geological processes in areas of existing buildings and structures.

**Keywords:** *suffusion instability, eluvium, carbonate soil, weathering crust, fracturing*

### REFERENCES

1. Aver'yanov, V.I., Bludorova, E.A., Yasonov, P.G. *Kazanskoe Povolzh'e i Prikam'e* [Kazan Volga and Kama regions]. *Pliotsen i pleistotsen Volg-Ural'skoi oblasti* [Pliocene and Pleistocene in the Volga-Urals region]. Moscow, Nauka Publ., 1981, pp. 95–118. (in Russian)
2. Anikeev, A.V., Chumachenko, S.A. *Karstovo-suffuzionnye provaly Bugul'minsko-Belebeevskoi vozvyshennosti* [Karst and suffusion sinkholes at the Bugul'ma-Belebeey Upland]. *Geomorfologiya*, 2011, no. 3, pp. 32–41. (in Russian)
3. Bondarik, G.K., Pendin, V.V., Yarg, L.A. *Inzhenernaya geodinamika* [Engineering geodynamics]. Moscow, KDU Publ., 2007, 440 p. (in Russian)
4. Yolkin, V.A. *Otsenka karstovoi opasnosti pri inzhenernykh izyskaniyakh: obzor rossiiskikh normativnykh tekhnicheskikh dokumentov* [Karst hazard assessment upon engineering survey: a review of the Russian technical standard documents]. *Inzhenernye izyskaniya*, 2018, no. 11–12, pp. 12–24. (in Russian)
5. Latypov, A.I., Garaeva, A.N., Luneva, O.V. *Kharakteristika suffuzionnoi opasnosti territorii Bugul'minskogo plato Bugul'minsko-Belebeevskoi vozvyshennosti* [Characteristics of suffusion hazard at Bugul'ma Plateau of the Bugul'ma-Belebeey Upland]. *Gruntovedenie*, 2022, no. 1 (18), pp. 31–43. (in Russian)
6. P 49–90 (VNIIG). *Rekomendatsii po metodike laboratornykh ispytaniy gruntov na vodopronitsaemost' i suffuzionnyu ustoychivost'* [Recommendations on the methods of laboratory testing of soils for water penetrability and suffusion stability]. Leningrad, VNIIG im. V.E. Vedeneeva, 1991. URL: <https://law.rufox.ru/view/9/19491.htm> (in Russian)
7. P 56–90 (VNIIG). *Rekomendatsii po proektirovaniyu obratnykh fil'trov gidrotekhnicheskikh sooruzhenii* [Recommendations on projecting reverse filters of hydraulic power engineering structures]. St. Petersburg, VNIIG im. V.E. Vedeneeva, 1992. URL: <https://normacs.net/Doclist/doc/11FL0.html> (in Russian)
8. Ragozin, A.L. *Regional'naya otsenka karstovoi opasnosti i riska* [Regional assessment of karst hazard and risk]. *Problemy bezopasnosti i chrezvychainykh situatsii*, 2003, no. 4, pp. 33–52 (in Russian)
9. Strokova, L.A., Epifanova, E.A. *Otsenka suffuzionnoi opasnosti territorii pos.Sabetta (poluostrov Yamal)* [Suffusion hazard assessment in the Sabetta settlement territory (Yamal Peninsula)]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov*. 2021, vol. 332, no. 7, pp. 95–106. (in Russian)
10. Strokova, L.A., Leonova, A.V. *Otsenka suffuzionnoi opasnosti na territorii g. Tomsk* [Suffusion hazard assessment in the Tomsk territory]. 2021, vol. 332, no. 5, pp. 49–59 (in Russian)
11. Khomenko, V.P. *Zakonomernosti i prognoz suffuzionnykh protsessov* [Regularities and forecast of suffusion processes]. Moscow, GEOS Publ., 2003, 216 p. (in Russian)
12. Derakhshan-Babaei, F., Nosrati, K., Tihomirov, D. et al. Relating the spatial variability of chemical weathering and erosion to geological and topographical zones. *Geomorphology*, 2020, p. 363.
13. Dong, X., Cohen, M., Martin, J. et al. Ecohydrologic processes and soil thickness feedbacks control limestone-weathering rates in a karst landscape. *Chemical Geology*, 2019, vol. 527. DOI: 10.1016/J.CHEMGEO.2018.05.021
14. Latypov, A., Zharkova, N., Mouraviev, F. Dispersed weathering products of carbonate rock: Features and formation conditions from the construction's point of view (by the example of Kazan, Russia) // Proc. of the Int. Symp. and 9th Asian regional conference of IAEG "Global View of Engineering Geology and the Environmental", Beijing, China, 2013, pp. 891–896.
15. Meyer N., Kuhwald M., Petersen J. et al. Soil development in weathering pits of a granitic dome (Enchanted Rock) in central Texas. *Catena*, 2021, vol. 199, no. 105084. DOI: 10.1016/j.catena.2020.105084.
16. Startsev, A. Soils on eluvium of Permian carbonate deposits and the change in their chemical properties under the influence of bog formation. *Moscow University Soil Science Bulletin*, 1985, vol. 40, no. 3, pp. 1–7.

## ЗАГРЯЗНЕНИЕ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

УДК 504.054+504.37+504.064.2

## ОЦЕНКА ТОКСИЧНОСТИ СНЕЖНОГО ПОКРОВА ПРИДОРΟЖНЫХ ТЕРРИТОРИЙ Г. ВЛАДИМИР

© 2022 г. Т. А. Трифонова<sup>1,2</sup>, Ю. Н. Курбатов<sup>2</sup>, И. Н. Курочкин<sup>2,\*</sup>, О. В. Савельев<sup>2</sup>,  
О. Г. Селиванов<sup>2</sup>, А. А. Марцев<sup>2</sup><sup>1</sup> ФГБОУ ВО Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,  
Ленинские горы, 1, Москва, 119991 Россия<sup>2</sup> ФГБОУ ВО “Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых”,  
ул. Горького, 87, Владимир, 600000 Россия

\*E-mail: ivan33vl@yandex.ru

Поступила в редакцию 28.04.2022 г.

После доработки 13.06.2022 г.

Принята к публикации 17.06.2022 г.

Проведена оценка уровня токсичности снежного покрова придорожных территорий улиц г. Владимир с наиболее интенсивным движением автотранспорта. Изучен ряд общехимических показателей талой воды, полученной из снега на придорожных территориях, и определены возможные загрязнители, которые могут влиять на токсичность снежного покрова. Установлено, что наибольшее содержание тяжелых металлов (ТМ) находится в твердом осадке, полученном после фильтрования талых вод. Высокие концентрации выявлены в зависимости от точек отбора по Cu, Ni, выше установленных норм – по As и Co. В фильтрате талых вод содержание ТМ незначительно, что обусловлено слабощелочной реакцией талой воды придорожных территорий. В талой воде обнаружено повышенное солесодержание, что связано прежде всего с применением в качестве антигололедного средства песчано-солевой смеси на основе хлорида натрия. Выявлены высокие концентрации нефтепродуктов в талой воде со всех исследуемых улиц по сравнению с контролем. Оценка общей интегральной токсичности отфильтрованных проб талой воды методом биотестирования показала, что все они токсичны. Для снижения антропогенной нагрузки на почвы придорожных территорий снег с этих территорий должен быть утилизирован – вывезен на специальные полигоны и очищен перед сбросом в поверхностные водоемы до установленных нормативов.

**Ключевые слова:** снежный покров, придорожная территория, тяжелые металлы, противогололедные материалы, хлорид натрия, нефтепродукты, интегральная токсичность, экологическая опасность

DOI: 10.31857/S0869780922060091

## ВВЕДЕНИЕ

Снежный покров служит важнейшим индикатором состояния окружающей среды и, в частности, атмосферного воздуха, из-за способности накапливать загрязняющие вещества. Известно, что качество атмосферного воздуха определяется интенсивностью его загрязнения выбросами, как от стационарных, так и передвижных источников загрязнения. Так, на долю автотранспорта в г. Владимир приходится более 75% выбросов веществ<sup>1</sup>. Все эти выбросы аккумулируются вдоль автотрасс и особенно отчетливо на придорожных территориях [10, 14, 15]. Наличие снежного по-

крова позволяет провести качественную и количественную оценку содержания загрязнителей и определить их общую экологическую опасность, так как накопленные за зиму в снеге токсичные элементы, поступающие весной в виде талых вод в почвы и водоемы, способны стать причиной их загрязнения. В снежном покрове могут накапливаться органические и неорганические соединения в виде твердых частиц и аэрозольных загрязняющих веществ (ЗВ), в том числе и в виде тяжелых металлов (ТМ). Твердые частицы загрязняют снег преимущественно за счет техногенного фактора через осаждение пыли, золы, сажи, дыма. Источниками твердых веществ выступают автомобильный транспорт, промышленные предприятия, электростанции. Особенно много твердых веществ выбрасывается в атмосферу в зимний период, когда сжигается максимальное количество топлива, и в результате гравитационного осажде-

<sup>1</sup> О состоянии окружающей среды и здоровья населения Владимирской области в 2020 г.: ежегодный доклад // Администрация Владим. обл., Департамент природопользования и охраны окружающей среды. Владимир: ГБУ ВО “Экорегиян”. 2021. Вып. 28. 172 с.

ния активно они загрязняют снег. Кроме того, источником твердых компонентов в снежном покрове на придорожных территориях являются противогололедные песчано-солевые смеси, которые используют для подсыпки против оледенения автодорог.

Известно, что загрязнение снежного покрова происходит в два этапа. Во-первых, это загрязнение снежинок вокруг ядер конденсации (пылинок, капель и др.) в облаке, а также сорбция примесей при прохождении снежинок сквозь атмосферу и выпадения на местность — влажное выпадение ЗВ со снегом. Во-вторых, это загрязнение уже выпавшего снега в результате сухого выпадения ЗВ из атмосферы (аэрозоли, пыль, зола, дымы, выхлопные газы и др.) [4, 7]. Эти два источника поступления загрязняющих компонентов в снег в основном определяют формирование региональных геохимических характеристик снегового покрова на придорожных территориях.

Состав компонентов загрязняющих снег аэрозолей очень разнообразен и включает вещества естественного биогенного, геологического и антропогенного происхождения. К биогенным соединениям, продуцируемым непосредственно биологическими системами, относятся главным образом кислородосодержащие структуры: жирные кислоты ( $C_{10}-C_{18}$ ) и их эфиры, альдегиды, спирты, токоферолы, терпеноиды, а также амины и другие азотосодержащие соединения [9].

Соединения антропогенного происхождения представлены циклогексанами, входящими в состав автомобильного топлива, циклическими ароматическими кетонами (продуктами горения автомобильных топлив), *n*-алканами (их происхождение связано как с биогенным генезисом, так и антропогенными источниками), антипиреном трифенилфосфатом и его гомологами и т.д. Это касается и органических веществ, включая такие канцерогенные загрязнители, как пирогенные полициклоароматические углеводороды (ПАУ) и диоксины [2].

Важным моментом является наблюдаемая тенденция увеличения в последнее время в городах объемов пыли различного происхождения [13]. Пыль непрерывно накапливается на поверхностях в виде пылегрязевого осадка и является основной средой, которая переносит загрязнение. При этом негативные экологические эффекты связаны, прежде всего, с накоплением в пылегрязевом осадке таких поллютантов, как ТМ, нефтепродукты, полициклические соединения и другие опасные органические вещества [12, 18, 19]. Ветровой подъем мелкодисперсной фракции способствует горизонтальному переносу поллютантов с материалом грязевого осадка [12]. В зимний период отмечается абразивное истирание до-

рожных покрытий шипованными колесами автомобилей. Загрязнение атмосферы от разных источников передается в снежный покров, накапливающий и сохраняющий геохимическую информацию до начала таяния снега [1, 3]. Все это приводит к тому, что пылевая фракция снежного покрова придорожных территорий имеет значительно более высокие величины по содержанию токсичных элементов, что может приводить к их интенсивному поступлению в почвенный покров в условиях урбанизированной территории. Таким образом, снежный покров аккумулирует в себе практически все загрязнители, поступающие в атмосферу с антропогенными выбросами. Изучение снежного покрова может дать точную оценку экологического состояния данной территории, установить динамику накопления ЗВ, оценить степень их токсичности и уровень воздействия на окружающую среду.

Цель данного исследования — определение токсичности снежного покрова придорожных территорий г. Владимир с целью установления степени антропогенного воздействия на окружающую среду.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объект данного исследования — снежный покров придорожных территорий г. Владимир.

Город Владимир — областной центр, численность населения 350 тыс. человек, является промышленным, научным и культурным центром в Центральном Федеральном округе. С начала 1990-х гг. наблюдаются процессы упадка промышленности, ввиду чего многие предприятия перепрофилировались, значительно уменьшился спектр производимой продукции, снизились производственные мощности. Многие промышленные предприятия прекратили свою деятельность. В результате сокращения производственной деятельности количество выбросов ЗВ в атмосферу от стационарных источников сократилось. В то же время началось увеличение численности автомобильного транспорта (в том числе и грузового) и развитие автомобильной инфраструктуры.

Владимир — крупный транспортный узел на федеральной трассе М-7 “Волга” с большим потоком грузового и легкового автомобильного транспорта, которые оказывают существенное влияние на загрязнение воздушного бассейна города различными токсичными веществами, в том числе и ТМ.

Транспортная инфраструктура города представлена двумя основными транспортными артериями — трассой М-7 и последовательностью улиц (пр. Ленина — ул. Дворянская — ул. Большая Московская — ул. Большая Нижегородская — ул. Добросельская) (рис. 1). В последние годы



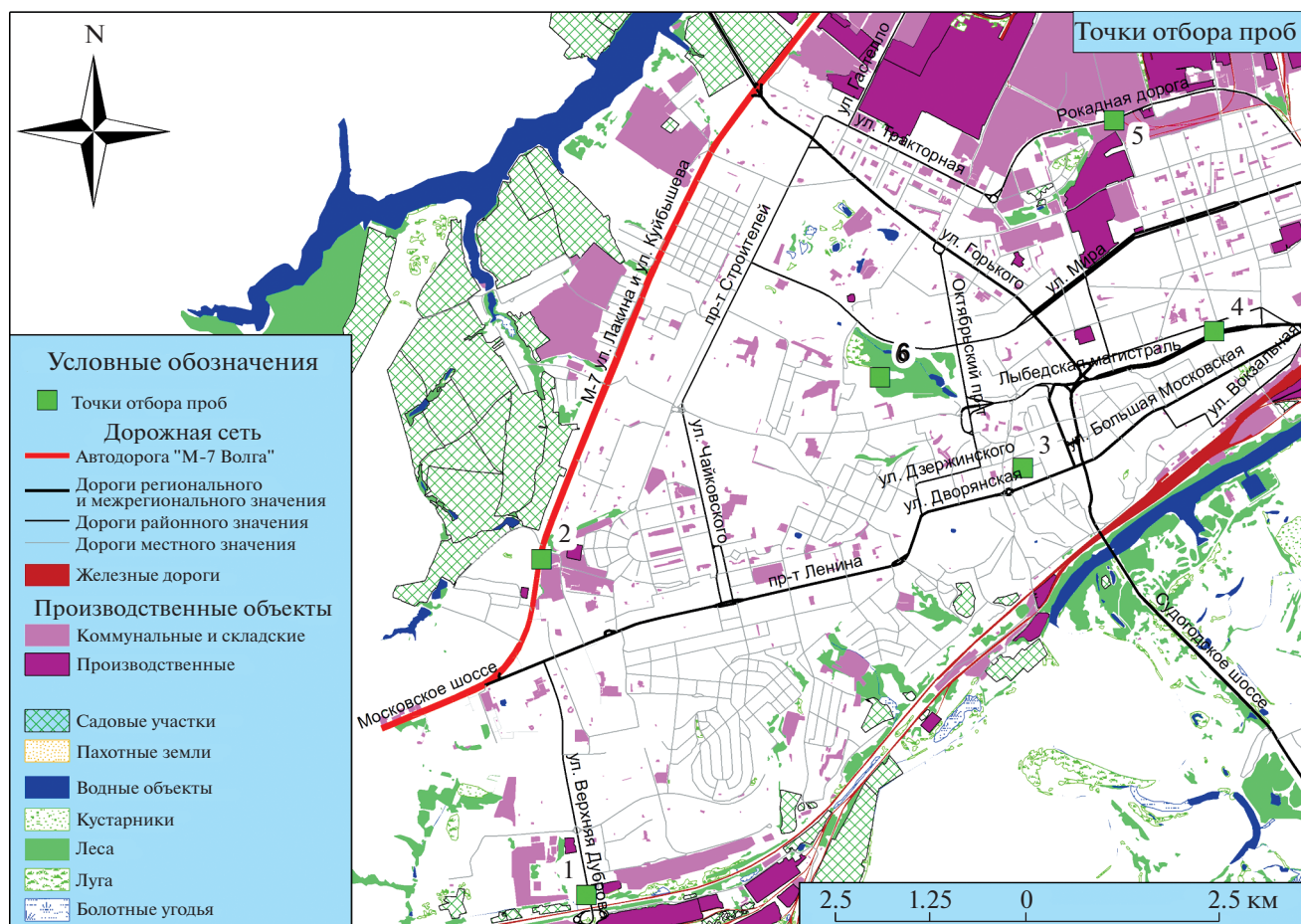


Рис. 1. Места отбора проб снега придорожных территорий г. Владимир.

введена в эксплуатацию Лыбедская магистраль, строительство которой предусматривало разгрузку автотранспорта от центральной части города, где расширение проезжей части невозможно из-за наличия исторической застройки и памятников архитектуры.

По климатическим условиям г. Владимир находится в зоне умеренно континентального климата. Зима умеренно холодная, со сменяющимися периодами сильных морозов и потеплений, достигающих порой до оттепелей. Весна приходит к апрелю, средняя температура января  $-12^{\circ}\text{C}$ , июля около  $+18^{\circ}\text{C}$ . Среднегодовое количество осадков 550–600 мм, максимум осадков приходится на лето. Зимой формируется устойчивый снежный покров, толщиной до 55 см к концу марта (лежит в среднем 144 дня). Окончательно снег сходит в середине апреля при переходе среднесуточной температуры через  $+5^{\circ}\text{C}$ . В среднем снеговой покров держится 4–5 мес [5].

Для оценки концентрации ЗВ в снеге придорожной территории были отобраны пробы снега с улиц города с высокой плотностью движения автомобильного транспорта. Места отбора проб

снега с ул. Верхняя Дуброва (точка 1), ул. Лакина (точка 2), ул. 1-я Никольская (точка 3), Лыбедской магистрали (точка 4), Рокадной дороги (точка 5) представлены на рис. 1.

В качестве контроля была отобрана проба снега в районе ул. Мира (точка 6) около Дома творчества юных (ДТЮ) (рис. 2а), где влияние автомобильного транспорта минимально.

Пробы снега отбирали в конце февраля 2022 г. в соответствии с ГОСТ 17.1.5.05-85<sup>2</sup>. Отбор проб проводили в один и тот же день при помощи цилиндрического пробоотборника. Пробы отбирались на расстоянии 3 м от края дороги. На рис. 2б представлено место отбора проб на ул. Верхняя Дуброва. В соответствии с ГОСТом отбирали объединенные пробы, вырезая керны на всю глубину снежного массива до границы с почвенным покровом. Затем объединенные снежные пробы растапливали при комнатной температуре в сбор-

<sup>2</sup> ГОСТ 17.1.5.05-85 Общие требования к отбору проб поверхностных и морских вод, льда и атмосферных осадков. М.: Изд-во стандартов, 1985. 26 с. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200008297>



Рис. 2. Места отбора проб в районе: (а) – ул. Мира (точка 6), (б) – ул. Верхняя Дуброва (точка 1).

ных пластиковых емкостях. Талую воду фильтровали через бумажный фильтр “белая лента”.

Определение ТМ в подготовленных фильтрах талой воды проводили в соответствии с методикой М-049-ВП/09<sup>3</sup> рентгенофлуоресцентным методом после концентрирования их пирролидинитиокарбаминатных комплексов на фильтрах. Определение ТМ в твердом осадке, после фильтрации талых вод образцов проб проводили по “Методике измерений массовой доли металлов и оксидов металлов в порошковых пробах почв и донных отложений рентгенофлуоресцентным методом” (М-049-ПДО/18<sup>4</sup>). Водородный показатель образцов талых вод определяли на рН-метре Mettler Toledo Seven Compact S220, общую минерализацию (сухой остаток) образцов проб талой воды определяли по ГОСТ 18164-72. Содержание хлорид-ионов определяли по ГОСТ 4245-72. Содержание нефтепродуктов в воде проводили на основании “Методики измерений массовой концентрации нефтепродуктов в пробах природных, питьевых, сточных вод флуориметрическим методом на анализаторе жидкости “Флюорат-02” (ПНД Ф14.1: 2: 4.128–98)<sup>5</sup>.

<sup>3</sup> Определение Cd, Se, As, V, Bi, Fe, Co, Cu, Ni, Pb, Cr, Zn в пробах природных, питьевых и сточных вод (ФР.1.31.2011.09287). URL: <https://spectronxray.ru/techniques/ekologiya/16/>

<sup>4</sup> URL: <https://docs.cntd.ru/document/437215682>

<sup>5</sup> URL: <https://docs.cntd.ru/document/437145094>

Определение интегральной токсичности образцов талых вод на люминометре “Биотокс-10М” по методике экспрессного определения интегральной токсичности<sup>6</sup>. Данная методика предусматривает измерение интенсивности биолюминесценции тест-объекта, в качестве которого используются лиофилизированные люминесцентные бактерии или ферментные препараты бактериальной люциферазы, входящие в состав биосенсора “Эколюм” (ТУ 2639-236-00209792-01). Методика основана на определении изменения интенсивности биолюминесценции бактерий в зависимости от содержания в анализируемой пробе химических веществ-токсикантов по сравнению с контролем (дистиллированная вода).

Выводы о токсичности пробы делались на основе изменения интенсивности биолюминесценции бактерий (имп/с) по сравнению с контролем за 30-минутный период экспозиции. Уменьшение интенсивности биолюминесценции пропорционально токсическому эффекту “Т”, который устанавливает характер ответа биосенсора на токсичность среды и рассчитывается по формуле:

$$T = \frac{I_0 - I}{I_0} \times 100,$$

<sup>6</sup> МР № 01.021-07. Методика экспрессного определения интегральной химической токсичности питьевых, поверхностных, грунтовых, сточных и очищенных сточных вод с помощью бактериального теста “Эколюм”. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200059374>



**Таблица 1.** Ближайшие объекты-загрязнители и загруженность автомобильных дорог в местах точек отбора проб снега

| № точки | Местоположение         | Ближайшие объекты – загрязнители   | Загруженность дороги автомобильным транспортом |
|---------|------------------------|--|--|
| 1       | Ул. Верхняя Дуброва    | Завод “Эталон” – 350 м<br>Железная дорога – 100 м<br>“Владимиртеплогазстрой” – 450 м | Средняя  |
| 2       | Ул. Лакина (трасса М7) | Обувная фабрика – 200 м  | Очень высокая                                  |
| 3       | Ул. 1-я Никольская     | –  | Средняя  |
| 4       | Лыбедская магистраль   | –  | Высокая  |
| 5       | Рокадная дорога        | Завод “Электроприбор” – 250 м<br>Владимирский электромоторный завод (ВЭМЗ) – 400 м   | Высокая  |
| 6       | Ул. Мира               | –  | Низкая   |

**Таблица 2.** Содержание тяжелых металлов в фильтрах талой воды

| № точки | Местоположение       | Содержание тяжелых металлов, мг/дм <sup>3</sup> |       |       |       |       |       |       |       |
|---------|----------------------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|         |                      | Pb  | Zn    | Cu    | Ni    | Fe    | Cr    | V     | Co    |
| 1       | Ул. В. Дуброва       | 0.002   | 0.029 | 0.018 | 0.003 | 0.538 | 0.001 | 0.004 | 0.002 |
| 2       | Ул. Лакина (М7)      | 0.002   | 0.003 | 0.006 | 0.003 | 0.256 | 0.001 | 0.003 | 0.001 |
| 3       | Ул. 1-я Никольская   | 0.002   | 0.008 | 0.006 | 0.003 | 0.554 | 0.002 | 0.003 | 0.002 |
| 4       | Лыбедская магистраль | 0.001   | 0.012 | 0.016 | 0.002 | 0.237 | 0.002 | 0.003 | 0.001 |
| 5       | Рокадная дорога      | 0.002   | 0.017 | 0.019 | 0.003 | 0.124 | 0.002 | 0.003 | 0.001 |
| 6       | Ул. Мира (ДТЮ)       | 0.001   | 0.001 | 0.003 | 0.001 | 0.088 | 0.001 | 0.001 | 0.001 |

где  $I_0$  и  $I$  – интенсивность биолюминесценции контроля и опыта соответственно.

Методика предусматривает три пороговых уровня токсичности:

- допустимый уровень токсичности ( $T < 20$ );
- образец токсичен ( $20 \leq T < 50$ );
- высокая токсичность образца ( $T \geq 50$ ).

В ряде случаев индекс токсичности может иметь отрицательное значение (при  $I > I_0$ ), тогда делается вывод об отсутствии токсичности образца, и индекс токсичности принимает нулевое значение.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На первом этапе работы было определено содержание ТМ в подготовленных фильтрах талой воды проб снега с придорожных территорий улиц Владимира. Можно предположить, что

именно ТМ вносят максимальный вклад в общую токсичность снежного покрова как химические элементы, способные оказывать вредное воздействие на организм человека, животных и растений. Их наличие в снежном покрове можно связать, прежде всего, с интенсивностью газодушных выбросов проходящего автотранспорта и близостью расположения ряда промышленных предприятий. В табл. 1 представлены ближайшие объекты-загрязнители, и дана характеристика загруженности автомобильных дорог в местах точек отбора проб снега.

Результаты анализов определения ТМ в подготовленных фильтрах талой воды представлены в табл. 2, из которой видно, что содержание водорастворимых форм ТМ в снежном покрове придорожных территорий всех пяти улиц Владимира немного выше, чем их уровень в контроле (ул. Мира, район ДТЮ). Можно отметить не-

**Таблица 3.** Водородный показатель и общая минерализация проб талых вод

| № точки | Местоположение       | pH, ед. | Общая минерализация (солесодержание), мг/дм <sup>3</sup> |
|---------|----------------------|---------|--|
| 1       | Ул. В. Дуброва       | 7.71    | 68.50  |
| 2       | Ул. Лакина (М7)      | 7.33    | 107.01   |
| 3       | Ул. 1-я Никольская   | 7.08    | 45.71  |
| 4       | Лыбедская магистраль | 7.47    | 61.68  |
| 5       | Рокадная дорога      | 7.41    | 80.52  |
| 6       | Ул. Мира (ДТЮ)       | 7.05    | 30.18  |

**Таблица 4.** Содержание ТМ в твердой фракции после фильтрования талых вод

| № точки             | Местоположение       | Содержание ТМ, мг/кг |       |       |       |      |       |       |       |
|---------------------|----------------------|----------------------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|
|                     |                      | Pb                   | Zn    | Cu    | Ni    | As   | Cr    | V     | Co    |
| 1                   | Ул. В. Дуброва       | 5.31                 | 22.06 | <нпко | 6.19  | 1.46 | <нпко | <нпко | 5.28  |
| 2                   | Ул. Лакина (М7)      | 14.99                | 37.75 | 11.86 | 19.97 | 5.18 | 63.21 | 67.89 | 13.83 |
| 3                   | Ул. 1-я Никольская   | 11.48                | 16.05 | 33.41 | 9.18  | 1.81 | <нпко | 6.07  | 2.69  |
| 4                   | Лыбедская магистраль | 5.81                 | 18.34 | 11.40 | 6.50  | 3.33 | <нпко | 15.29 | 4.51  |
| 5                   | Рокадная дорога      | 11.21                | 18.01 | 17.55 | 9.32  | 3.13 | 16.26 | 10.75 | 1.71  |
| 6                   | Ул. Мира (ДТЮ)       | 0.34                 | 1.38  | 0.04  | 1.04  | 0.02 | 0.03  | 1.21  | 0.02  |
| ПДК или ОДК (мг/кг) |                      | 32.0                 | 55.0  | 33.0  | 20.0  | 2.0  | 6.0   | 150.0 | 5.0L  |
| Источник            |                      | 2                    | 3     | 3     | 3     | 3    | 2     | 1     | 2     |

**Примечание:** <нпко – нижний предел количественного определения. Источник: 1 – Перечень предельно-допустимых концентраций (ПДК) и ориентировочно-допустимых количеств (ОДК) химических веществ в почве. Изд. спец. М.: Изд-во Госкомсанэпиднадзора России. 1991. 18 с.; 2 – ГН 2.1.7.2041-06. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве; 3 – ГН 2.1.7.2511-09. Ориентировочно-допустимые концентрации (ОДК) химических веществ в почве.

большое превышение по таким металлам, как цинк, медь, никель, ванадий, но обнаруженные практически в следовых количествах концентрации данных металлов угрозы для окружающей среды не представляют. Это связано, по-видимому, с тем, что на содержание ТМ в водорастворимой форме значительное влияние оказывает кислотность талой воды.

В табл. 3 приведены значения показателей pH и общей минерализации проб талых вод. По значениям pH видно, что талые воды ближе к нейтральной и слабощелочной среде, что во многом объясняет слабую водорастворимость ТМ и соответственно их низкие концентрации в отфильтрованной воде.

Для чистого снега значение pH обычно составляет 5.6–5.8, что связано с наличием в воздухе

СО<sub>2</sub>, образующим угольную кислоту, подкисляющую атмосферные осадки. Чем больше в снежный покров попадает различных загрязнителей и солей, тем pH его выше. Водородный показатель талой воды всех пяти исследуемых снежных покровов придорожных территорий находится в слабощелочной зоне, что очевидно свидетельствует об их потенциальной загрязненности.

Определение общей минерализации показало, что солесодержание в талой воде на всех пяти исследуемых улицах в 2–3 раза выше, чем в контроле (ул. Мира, район ДТЮ) и максимально на федеральной трассе М-7 (ул. Лакина) – 107.01 мг/дм<sup>3</sup>.

Твердую фракцию, оставшуюся на фильтре после фильтрования талых вод, также проанализировали на содержание ТМ. Результаты определений представлены в табл. 4, из которых видно,

**Таблица 5.** Содержание нефтепродуктов и хлорид-ионов в пробах талых вод

| № точки | Местоположение       | Нефтепродукты, мг/дм <sup>3</sup> | Хлорид-ионы, мг/дм <sup>3</sup> |
|---------|----------------------|-----------------------------------|---------------------------------|
| 1       | Ул. В. Дуброва       | 0.18                              | 13.09                           |
| 2       | Ул. Лакина (М7)      | 0.12                              | 31.01                           |
| 3       | Ул. 1-я Никольская   | 0.19                              | 6.89                            |
| 4       | Лыбедская магистраль | 0.79                              | 15.6                            |
| 5       | Рокадная дорога      | 0.37                              | 23.43                           |
| 6       | Ул. Мира (ДТЮ)       | 0.03                              | 1.76                            |

что содержание ТМ в осадке, полученном после фильтрования талой воды, достаточно высокое относительно контроля на всех пяти участках. По меди (ул. 1-я Никольская), никелю (ул. Лакина, М7) уже достигнуты значения установленных гигиенических нормативов. Значительно превышены установленные нормы по мышьяку (ул. Лакина, Лыбедская магистраль, Рокадная дорога), по кобальту (ул. Лакина и ул. Верхняя Дуброва).

Учитывая тот факт, что концентрации ТМ отражают их накопление в пыле-грязевом осадке снежного покрова за период, равный трем месяцам (время образования снежного покрова, из которого отбирали пробы), можно предположить, что концентрации данных токсикантов за условный год будут в 4 раза выше, а это уже несет серьезную потенциальную опасность окружающей среде и, в частности, почвенному покрову придорожной территории.

В контроле обнаружены низкие концентрации ТМ, что связано с отсутствием вблизи места отбора пробы автомобильного транспорта. Незначительное загрязнение снежного покрова данной территории связано с выпадением загрязненных атмосферных осадков (снега) и возможным переносом пылевой фракции, сорбирующей на себя тяжелые металлы.

Значительное загрязнение ТМ твердой фракции снежного покрова придорожных территорий исследуемых улиц, в первую очередь, связано с газоздушными выбросами автомобильного транспорта, так как все указанные выше металлы присутствуют в выхлопных газах автотранспорта.

Негативное влияние на токсичность снега придорожной территории могут оказывать песчано-солевые (противогололедные) смеси, которыми обрабатывают дороги, и нефтепродукты, которые попадают в придорожный снег вследствие работы автотранспорта. В табл. 5 представлены результа-

ты измерений концентраций нефтепродуктов и хлорид-ионов в талой воде.

Определение концентраций нефтепродуктов в талой воде показало, что по сравнению с контролем на всех участках отбора концентрации обнаруженных нефтепродуктов значительно выше, а на двух (точки 4, 5) превышают норму (0.3 мг/дм<sup>3</sup>) гигиенического норматива ГН 2.1.5.1315–03<sup>7</sup>. Таким образом, содержание повышенных концентраций нефтепродуктов в талой воде исследуемых участков представляет опасность для окружающей среды, которые с талыми водами могут попадать в водоемы и оказывать токсическое действие на водные экосистемы.

Из табл. 5 также видно, что содержание хлорид-ионов в талой воде исследуемых улиц значительно выше, чем в контроле. Наличие большого количества хлорид-ионов в талой воде указывает на то, что для борьбы с оледенением автотранспортных магистралей в зимний период времени активно используется песчано-солевая смесь на основе технической поваренной соли (минерал галит) для повышения коэффициента сцепления с дорожным покрытием. Широкое использование хлорида натрия в качестве антигололедного средства по сравнению с другими средствами на основе хлоридов (CaCl<sub>2</sub>, MgCl<sub>2</sub>) объясняется, прежде всего, его дешевизной, но при этом поваренная соль является довольно токсичным элементом [16, 17]. Содержание в фильтрованной талой воде в избыточном количестве хлорид-ионов свидетельствует о том, что часть песчано-солевой смеси попадает в снежный покров придорожной территории. При таянии снега весной водорас-

<sup>7</sup> ГН 2.1.5.1315-03 "Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования". Утвержден Главным государственным санитарным врачом РФ 27.04.2003. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data1/41/41363/>



Рис. 3. Индекс токсичности отфильтрованных проб талой воды.

творимый NaCl попадает в почву, в бассейны поверхностных водоемов, что грозит ухудшением состояния многих компонентов экосистем, в том числе и засолением почв [6, 11].

На последнем этапе исследований была проведена оценка интегральной токсичности (индекса токсичности) отфильтрованных проб талой воды на люминометре “Биотокс-10М”. Результаты представлены на рис. 3.

Видно, что образцы талой воды придорожных территорий ул. Лакина (М7), ул. В. Дуброва, Рокадной дороги, Лыбедской магистрали являются токсичными, а ул. 1-Никольской – высокотоксичным. Только проба талой воды ул. Мира (контроль) имеет допустимый уровень токсичности. Таким образом, большая часть снега и талого стока на расстоянии 3 м от проезжей части имеет токсичный уровень, поэтому снег с данной территории должен быть утилизирован, вывезен на специальные полигоны и очищен перед сбросом в поверхностные водоемы.

Полигоны должны быть полностью гидроизолированы, а площадки приема снега отделены от подстилающего грунта водонепроницаемым материалом, чтобы исключить попадание неочищенных талых вод в почву. Для очистки загрязненных талых вод, рядом с полигоном должны располагаться очистные сооружения с технологией двухступенчатой фильтрации.

Но в реальности токсичный снег с городских придорожных территорий поступает не на специальные полигоны, а на объекты приема снега (снежные свалки), которые не оборудованы ни очистными сооружениями, ни системами водо-

отведения, либо снег тает непосредственно на территории города. Так, во Владимире снег вывозят на Владимирскую станцию по утилизации снега в Михайловском овраге, территориально расположенную между ул. Гастелло и ТЦ “Ивановские мануфактуры”. В качестве природоохранного мероприятия на станции осуществлена обваловка территории, чтобы талые воды не попадали весной в окружающую среду. Площади данной станции хватает для вывоза снега из города в зимний период, но никаких очистных сооружений (оборудования для отстаивания и фильтрации талой воды) не предусмотрено. Таким образом, никаких экологических технологий по очистке загрязненных снежных масс в городе на сегодняшний день нет. Вся загрязненная талая вода через системы водоотведения попадает в природные среды, главным образом в поверхностные водоемы, нанося непоправимый вред всей живой среде. Обустройство станции по утилизации снега во Владимире очистными сооружениями должно стать приоритетной задачей как для администрации города, так и для природоохранных органов.

## ВЫВОДЫ

Исследованием установлено, что наибольшее содержание таких токсикантов, как тяжелые металлы, находится в твердом осадке талых вод, тогда как в фильтрате талых вод их содержание незначительно, что обусловлено слабощелочной реакцией талой воды придорожных территорий.

Во всех пробах талой воды придорожных территорий, за исключением контроля, выявлено

повышенное солесодержание, связанное прежде всего с применением в качестве антигололедного средства песчано-солевой смеси на основе хлорида натрия, оказывающего токсическое действие на водные, растительные и почвенные экосистемы.

В талой воде из проб снега, отобранных на исследуемых улицах, выявлено повышенное содержание нефтепродуктов, действие паров которых может вызвать токсическое действие как на живые почвенные, так и водные организмы.

Оценка интегральной токсичности отфильтрованных проб талой воды показала, что все они являются токсичными, а проба с ул. 1-й Никольской — высокотоксичной, что связано, прежде всего, с высокими концентрациями в них нефтепродуктов и хлорида натрия.

Для снижения антропогенной нагрузки на почвы придорожных территорий необходимо сократить применение токсичных реагентов, использовать, по-возможности, другие более инертные химические соединения, а снег с этих территорий должен быть утилизирован — вывезен на специальные полигоны и очищен перед сбросом в поверхностные водоемы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бондаревич Е.А.* Оценка техногенного загрязнения городской среды Читы по состоянию снежного покрова // Лед и Снег. Прикладные проблемы. 2019. Т. 59. № 3. С. 389–400.
2. *Василенко В.Н., Назаров И.М., Фридман Ш.Д.* Мониторинг загрязнения снежного покрова. Л.: Гидрометеиздат, 1995. 250 с.
3. *Воронцова А.В., Нестеров Е.М.* Геохимия снежного покрова в условиях городской среды // Известия РГПУ им. А.И. Герцена. 2012. № 147. С. 125–132.
4. *Кренделев Ф.П., Бордонский Г.С.* Геохимические и дистанционные поиски в зимний период // Геохимические критерии прогнозной оценки оруденения: сб. статей. Новосибирск: СО Наука, 1990. 224 с.
5. *Кулагина Е.Ю., Краснощёков А.Н.* Анализ значимых показателей погоды на территории Владимирской области // Экология речных бассейнов: Тр. IX Междунар. научно-практ. конф. Владимир: Изд-во ВлГУ, 2018. С. 534–540.
6. *Никифорова Е.М., Кошелева Н.Е., Хайбрахманов Т.С.* Экологические последствия применения противогололедных реагентов для почв Восточного округа Москвы // Вестник Московского университета. Сер. 5: География. 2016. № 3. С. 40–49.
7. *Рухтер Г.* Роль снежного покрова в физико-географическом процессе. Серия Тр. института географии АН СССР. Вып. XL М.-Л.: АН СССР. 1948 г. 172 с.
8. *Селезнев А.А., Ярмошенко И.В., Малиновский Г.П., Баглаева Е.М.* Оценка запасов современных пыле-грязевых отложений на урбанизированной территории (на примере г. Екатеринбурга) // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. 2018. № 3 (23). С. 74–85.
9. *Стрельникова Е.Б., Русских И.В., Кадычагов П.Б.* Состав органических компонентов снегового покрова в районах Томской области с различной техногенной нагрузкой // Химия в интересах устойчивого развития. 2018. Т. 26. № 2. С. 203–210.
10. *Трифонова Т.А., Подолец А.А., Селиванов О.Г., Марцев А.А.* Оценка загрязнения почв рекреационных территорий промышленного города соединениями ТМ и мышьяка // Теоретическая и прикладная экология. 2018. № 2. С. 94–101.
11. *Тюрина И.М., Патрушев Н.В., Наумов Д.Ю.* Влияние противогололедных реагентов на окружающую среду урбанизированных территорий // Геология и полезные ископаемые Западного Урала. 2017. № 17. С. 228–232.
12. *Aerosol chemical processes in the environment.* Spurny K.R (ed.), Boca Raton: CRC Press, 2000. 600 p.
13. *Apeagyei E., Bank M.S., Spengler J.D.* Distribution of heavy metals in road dust along an urban-rural gradient in Massachusetts // Atmospheric Environment. 2011. № 45 (13). P. 2310–2323.
14. *Martsev A., Selivanov O.* Assessment of the Roadside Soil Pollution by Vehicles at the New Road Section // Lecture Notes in Networks and Systems. 2022. V. 246. P. 870–877.
15. *Martsev A., Selivanov O.* Ecological – hygienic soil assessment of the federal highway roadside areas // E3S Web of Conf. Innovative Technologies in Environmental Science and Education, ITESE 2019. 2019. № 01044.
16. *Rust P., Ekmekcioglu C.* Impact of salt intake on the pathogenesis and treatment of hypertension // Adv. Exp. Med. Biol. 2017. V. 956. P. 61–84. [https://doi.org/10.1007/5584\\_2016\\_147](https://doi.org/10.1007/5584_2016_147)
17. *Sodium Intake for Adults and Children. Guideline.* Geneva: WHO, 2012. 46 p.
18. *Vitkalova I., Torlova A., Pikalov E., Selivanov O.* Development of environmentally safe acid-resistant ceramics using heavy metals containing waste // MATEC Web of Conf. ESCI 2018. 193, 03035.
19. *Wei B., Jiang F., Li X., Mu S.* Contamination level assessment of potential toxic metals in road dust deposited in different types of urban environment // Environmental Earth Sciences. 2010. V. 61. P. 1187–1196.

## ASSESSMENT OF SNOW COVER TOXICITY IN THE ROADSIDE TERRITORIES OF VLADIMIR

T. A. Trifonova<sup>a,b</sup>, Yu. N. Kurbatov<sup>b</sup>, I. N. Kurochkin<sup>b,#</sup>, O. V. Savel'ev<sup>b</sup>, O. G. Selivanov<sup>b</sup>,  
and A. A. Martsev<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Lomonosov Moscow State University,  
Leninskie Gory, 1, Moscow, 119991 Russia

<sup>b</sup> Vladimir State University,  
ul. Gor'kogo, 87, Vladimir, 600000 Russia

<sup>#</sup>E-mail: ivan33vl@yandex.ru

The level of snow cover toxicity in the roadside territories of the streets with the most intense traffic in Vladimir was assessed. A number of general chemical indicators of meltwater obtained from the snow of roadside areas have been studied and possible pollutants that can affect the toxicity of snow cover have been identified. The highest content of heavy metals was found in the solid sediment obtained from meltwater filtration. High concentrations were detected for Cu and Ni depending on the sampling points, and the concentrations above the established norms were revealed for As and Co. The content of heavy metals is insignificant in the meltwater filtrate, which is due to the slightly alkaline reaction of the meltwater in the roadside territories. Increased salinity was found in the meltwater, which is primarily due to the use of a sand-salt mixture based on sodium chloride as an anti-icing agent. Determination of the content of petroleum products in meltwater revealed their high concentrations in all streets studied as compared with the control. The assessment of the total integral toxicity of filtered melt water samples by biotesting proved all of them to be toxic. To reduce the anthropogenic load on soils in roadside territories, the snow from these territories should be removed to special landfills and cleaned before dumping into surface reservoirs to the established standards.

**Keywords:** snow cover, roadside area, heavy metals, deicing materials, sodium chloride, petroleum products, integral toxicity, environmental hazard

### REFERENCES

1. Bondarevich, E.A. *Otsenka tekhnogennoho zargyazneniya gorodskoi sredy Chity po sostoyaniyu snezhnogo pokrova* [Assessment of technogenic pollution of the Chita urban environment according to the state of the snow cover]. *Led i sneg. Prikladnye problemy*, 2019, vol. 59, no. 3, pp. 389–400. (in Russian)
2. Vasilenko, V.N., Nazarov, I.M., Fridman, Sh.D. *Monitoring zagryazneniya snezhnogo pokrova* [Monitoring of snow cover pollution]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1995, 250 p. (in Russian)
3. Vorontsova, A.V., Nesterov, E.M. *Geokhimiya snegovogo pokrova v usloviyakh gorodskoi sredy* [Geochemistry of snow cover in urban environment]. // *Izvestiya RGPU im. A.I. Gertsena*, 2012, no.147, pp. 125–132 (in Russian)
4. Krendelev, F.P. Bordonskii, G.S. *Geokhimicheskie i distantsionnye poiski v zimnii period* [Geochemical and remote search in winter]. *Gokhimicheskie kriterii prognoznoi otsenki orudneniya: sb.statei* [Geochemical criteria for predictive assessment of mineralization: collection of articles]. Novosibirsk, SO Nauka Publ., 1990, 224 p. (in Russian)
5. Kulagina, E. Yu., Krasnoshchekov, A.N. *Analiz znachimykh pokazatelei pogody na territorii Vladimirskoi oblasti* [Analysis of significant weather indicators in the territory of Vladimir region]. Ecology of river basins. Proc. IX Int. Sci. and Pract. Conf. Vladimir, VISU Publ., 2018, pp. 534–540. (in Russian)
6. Nikiforova, E.M., Kosheleva, N.E., Khaibrakhmanov, T.S. *Ekologicheskie posledstviya primeneniya protivogolelednykh reagentov dlya pochv Vostochnogo okruga Moskvy* [Environmental consequences of the use of deicing reagents for the soils of the Eastern district of Moscow]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Ser. 5: Geografiya*, 2016, vol. 3, pp. 40–49. (in Russian)
7. Rikhter, G.D. *Rol' snezhnogo pokrova v fiziko-geograficheskom protsesse* [The role of snow cover in the physico-geographical process]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1989, pp. 189. (in Russian)
8. Seleznev, A.A., Yarmoshenko, I.V., Malinovskii, G.P., Baglaeva, E.M. *Otsenka zapasov sovremennykh pylegryazevykh otlozhenii na urbanizirovannoi territorii (na primere g. Yekaterinburga)* [Estimation of reserves of modern dust and mud deposits in the urbanized area (by the example of Yekaterinburg)]. *Biosfernaya sovremnost': chelovek, region, tekhnologii*, 2018, vol. 3 (23), pp. 74–85. (in Russian)
9. Strel'nikova, E.B., Russkikh, I.V., Kadychagov, P.B. *Sostav organicheskikh komponentov snegovogo pokrova v raionakh Tomskoi oblasti s razlichnoi tekhnogennoi nagruzkoj* [Composition of organic components of snow cover in areas of the Tomsk region with various technogenic loads]. *Khimiya v interesakh ustoichivogo razvitiya*, 2018, vol. 26, no. 2, pp. 203–210. (in Russian)
10. Trifonova, T.A., Podolets, A.A., Selivanov, O.G., Martsev, A.A. *Otsenka zagryazneniya pochv rekreatsionnykh territorii promyshlennogo goroda soedineniyami TM*

- i mysh'yaka* [Assessment of soil contamination of recreational areas of an industrial city with compounds of heavy metals and arsenic]. *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya*, 2018, vol. 2, pp. 94–101. (in Russian)
11. Tyurina, I.M., Patrushev, N.V., Naumov, D.Yu. *Vliyaniye protivogolodnykh reagentov na okruzhayushchyuyu sredy urbanizirovannykh territorii* [The effect of deicing reagents on the environment of urbanized territories]. *Geologiya i poleznye iskopaemye Zapadnogo Urala*. 2017, vol. 17, pp. 228–232. (in Russian)
  12. Aerosol chemical processes in the environment. Spurny, K.R., Ed., Boca Raton: CRC Press, 2000. 600 p.
  13. Apeageyi, E., Bank, M. S., Spengler, J. D. Distribution of heavy metals in road dust along an urban-rural gradient in Massachusetts. *Atmospheric Environment*, 2011, no. 45 (13), pp. 2310–2323.
  14. Martsev, A., Selivanov, O. Assessment of the roadside soil pollution by vehicles at the new road section. *Lecture Notes in Networks and Systems*, 2022, vol. 246, pp. 870–877.
  15. Martsev, A., Selivanov, O. Ecological–hygienic soil assessment of the federal highway roadside areas. *E3S Web of Conferences. Innovative Technologies in Environmental Science and Education, ITESE 2019*, 2019, C. 01044.
  16. Rust, P., Ekmekcioglu, C. Impact of salt intake on the pathogenesis and treatment of hypertension. *Adv. Exp. Med. Biol.*, 2017, vol. 956, pp. 61–84. [https://doi.org/10.1007/5584\\_2016\\_147](https://doi.org/10.1007/5584_2016_147).
  17. Sodium Intake for Adults and Children. Guideline. Geneva: WHO, 2012, 46 p.
  18. Vitkalova, I., Torlova, A., Pikalov, E., Selivanov, O. Development of environmentally safe acid-resistant ceramics using heavy metals containing waste. *MATEC Web of Conferences. ESCI*, 2018, 193, 03035.
  19. Wei, B., Jiang, F., Li, X., Mu, S. Contamination level assessment of potential toxic metals in road dust deposited in different types of urban environment. *Environmental Earth Sciences*, 2010, vol. 61, pp. 1187–1196.



---

---

**УТИЛИЗАЦИЯ И ЗАХОРОНЕНИЕ  
ОТХОДОВ**

---

---

УДК 628.4

**ВЫЩЕЛАЧИВАНИЕ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ ИЗ ПРОДУКТОВ  
МЕХАНИКО-БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ  
ТВЕРДЫХ КОММУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ: СОСТАВ ФИЛЬТРАТА,  
ДОПУСТИМОСТЬ ЗАХОРОНЕНИЯ НА ПОЛИГОНАХ ТКО**© 2022 г. Т. И. Юганова<sup>1,\*</sup><sup>1</sup> *Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН,  
Уланский пер., 13, стр. 2, Москва, 101000 Россия**\*E-mail: tigryu@gmail.com*

Поступила в редакцию 30.05.2022 г.

После доработки 30.06.2022 г.

Принята к публикации 05.07.2022 г.

Рассмотрены характеристики выщелачивания загрязняющих веществ из продуктов механико-биологической обработки (МБО) твердых коммунальных отходов (ТКО). Изучена эволюция состава фильтратов в ходе МБО. Проведено сравнение обработанных отходов со свежими и выдержанными ТКО. Это важно для оценки риска загрязнения грунтовых вод от полигонов, принимающих стабилизированные отходы (СО). Проанализирована допустимость захоронения СО на полигонах ТКО в соответствии с критериями, принятыми в некоторых европейских странах. Рассмотрена связь выщелачивания растворенного органического углерода (РОУ) и тяжелых металлов (ТМ), выявлена прямая линейная корреляция для нескольких ТМ. Проведен анализ показателей выщелачиваемости металлов статистическим методом главных компонент, раскрывающий взаимосвязи параметров, которые определяют потенциальные эмиссии из СО. Анализ показал, что Си имеет сродство к подвижным гуминовым кислотам (ГК) или РОУ, а Zn, Cr и Ni и, в меньшей степени, Cd, Pb и Cu – к твердым ГК. Указанные различия во взаимодействии неподвижных и подвижных гумусовых веществ с ТМ требуют дальнейшего внимания, чтобы можно было разработать индивидуальные схемы мониторинга отходов МБО и оптимизировать процессы обработки для достижения желаемого качества СО.

**Ключевые слова:** *твердые коммунальные отходы, механико-биологическая обработка, стабилизированные отходы, выщелачивание, состав фильтрата, органическое вещество, тяжелые металлы, допустимость захоронения*

DOI: 10.31857/S086978092206008X

**ВВЕДЕНИЕ**

В настоящее время в Европе пытаются избежать прямого захоронения биоразлагаемых отходов, чтобы уменьшить их воздействия на окружающую среду. Такие воздействия, в частности, связаны с образованием сильно загрязненных фильтратов при окончательном захоронении этих отходов. В последние десятилетия ключевую роль в управлении отходами играет *механико-биологическая обработка отходов (МБО)* посредством аэробного компостирования и/или анаэробного сбраживания. МБО находит применение в качестве метода обработки, позволяющего наряду со сжиганием отходов или в качестве альтернативы сжиганию значительно уменьшить объем потока отходов, направляемых на захоронение, и, в частности, свести до минимума объем биологически реакционноспособных веществ в этом по-

токе [4, 18]. Процессы МБО и возможности использования биостабилизированного продукта описаны ранее в [5].

Принятые в отдельных государствах ЕС требования к стабилизированным отходам (СО) относительно допустимости их захоронения и использования выражаются в терминах общего химического состава (например, общего содержания тяжелых металлов (ТМ)), но при этом никаких ограничений по концентрациям в фильтрате не налагается. Однако выщелачивание растворимых компонентов из отходов при контакте с водой, рассматриваемое как основной механизм высвобождения этих компонентов, может привести к потенциальному риску для окружающей среды во время использования или захоронения этих отходов [15].

Широко признано, что предварительная обработка твердых коммунальных отходов (ТКО) со значительной органической фракцией влияет на поведение этих материалов в окружающей среде с позиций как эмиссии биогаза, так и качества, и количества фильтрата [19, 21, 22]. В последние годы было проведено несколько исследований, направленных на оценку основных характеристик СО; в основном эти работы были сосредоточены на оценке потенциального производства биогаза/биометана (ВР) с позиций объема и состава газа, образующегося из этих отходов. Напротив, характеристики выщелачивания этих материалов и влияние предварительной обработки на подвижность ТМ и, следовательно, их выделения с фильтратом все еще недостаточно изучены [19–21]. Однако сведения о составе фильтрата являются ключевыми для оценки долгосрочного воздействия свалки [12, 18]. Хотя при биообработке легко разлагаемое органическое вещество удаляется, **высвобождение загрязняющих веществ (ЗВ) с фильтратом можно рассматривать как главную долгосрочную угрозу окружающей среде.** Производство свалочного газа прекратится задолго до того, как активность фильтрата понизится до фоновых значений [12].

Долгосрочное поведение СО на полигонах будет отличаться от поведения необработанных ТКО из-за удаления определенных фракций отходов во время механической обработки и частичного разложения во время биологической обработки. Знание о газообразовании и выщелачивании СО необходимо для оценки рисков, связанных с принимающими их полигонами, а также для их эффективного проектирования, эксплуатации и последующего обслуживания, включая системы управления газом и фильтратом [21]. Что касается натуральных исследований на реальных полигонах, то пока нет данных о производительности полигонов, заполненных только СО [20], и имеется лишь немного данных о полигонах, куда поступали различные доли СО [19].

Следует отметить, что в ближайшие несколько лет характеристики захороненных СО и, как следствие, фильтрата и биогаза из них будут отличаться по качеству и количеству от имеющихся в настоящее время данных, которые относятся к захороненным ТКО. По этой причине важно, чтобы исследователи определяли и тестировали новые модели и/или инструменты для оценки качества СО, чтобы определить, можно ли не направлять их на полигоны, и в то же время оценить производство фильтрата и биогаза на полигонах, которые будут получать только остатки от переработки отходов [14].

В предыдущей публикации автора [5] было рассмотрено разнообразие состава и качества СО. Показано, что в ходе МБО в отходах уменьшается

содержание твердого органического углерода. Снижается количество алифатических метиленовых групп, уменьшается содержание альдегидов, кетонов, карбоновых кислот и сложных эфиров, увеличивается содержание ТМ, карбоната. На усиление разложения органического материала указывает более высокое содержание в СО твердых гуминовых кислот (ГК). Для некоторых ТМ степень гумификации СО положительно коррелирует с растворимостью металла.

Настоящая статья посвящена изучению СО на полигонах, главным образом характеристик их выщелачивания, в сравнении со свежими и выдержанными ТКО. Это важно для оценки риска загрязнения подземных вод от полигонов, принимающих СО.

В первую очередь СО характеризуются состоянием органического вещества как основного компонента, определяющего поведение загрязняющих веществ (ЗВ) при выщелачивании. Из них, прежде всего, должны вызвать озабоченность ТМ, так как они опасны даже в низких концентрациях, и аммоний, поскольку он характеризуется долгосрочным выделением из захороненных отходов [2].

## РАЗНООБРАЗИЕ СОСТАВА ФИЛЬТРАТОВ ИЗ СО

### *Эволюция состава фильтратов в ходе МБО*

В работе [22], ранее рассмотренной в [5], были изучены два вида СО — из Германии и Швеции. В табл. 1 представлены изменения состава фильтратов образцов отходов в ходе обработки. Материалы были элюированы посредством колонки с восходящим потоком, настроенной на отношение жидкой и твердых фаз  $L/S = 10$  л/кг.

Рассчитанное с использованием аналитических результатов из табл. 1 отношение  $BPK_2/XPK$  в фильтратах М1 (Германия) и М2 (Швеция) снизилось с 0.52 и 0.11 до 0.08 и 0.04 соответственно. Это можно рассматривать как показатель увеличения деградации органического вещества. Почти все характеристики фильтрата уменьшаются при сравнении исходных и конечных материалов. Исключениями являются медь, никель и ГК.

В М1 концентрация меди резко увеличилась в 3 раза за 2 недели, затем начала снижаться к 6-й неделе практически до исходной, а к 9-й неделе вновь возросла примерно в 2 раза от исходной. Для никеля ко 2-й неделе концентрация увеличилась примерно в 2.7 раза. Скорее всего, на 2-й неделе формируется наиболее активная ацетогенная стадия разложения отходов. Концентрация ГК в М1 была самой высокой к 6-й неделе.

В М2 концентрация ГК по окончании компостирования (24 недели) увеличилась примерно в 50 раз по сравнению с исходной, так как происхо-

**Таблица 1.** Характеризация фильтратов при  $L/S$  10 л/кг (пустые клетки – анализы не проводились) [22]

| Образец               | Фракция   | pH   | ЭП <sup>а</sup> , мСм/см | NH <sub>4</sub> , г/л | РОУ, мг/л | ГК, мг/л | Cd, мкг/л          | Cr, мкг/л | Cu, мкг/л | Ni, мкг/л | Pb, мкг/л | Zn, мг/л |
|-----------------------|-----------|------|--------------------------|-----------------------|-----------|----------|--------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|
| <i>М1, Германия</i>   |           |      |                          |                       |           |          |                    |           |           |           |           |          |
| Исходный              | <0.45 мкм | 5.90 | 6.57                     | 0.14                  | 3620      | 12.3     | 9.7                | 118       | 401       | 444       | 43        | 13.50    |
|                       | <100 кДа  | 5.92 | 6.72                     | 0.15                  | 3320      | 21.0     | 12                 | 98        | 448       | 403       | 53        | 11.70    |
|                       | <30 кДа   | 5.98 | 6.55                     | 0.14                  | 3130      | 53.0     | 12                 | 103       | 413       | 395       | 42        | 11.40    |
|                       | <5 кДа    | 6.05 | 6.36                     | 0.14                  | 3000      | 16.0     | 11                 | 103       | 389       | 382       | 15        | 11.20    |
| 2 нед                 | <0.45 мкм | 7.25 | 6.83                     | 0.22                  | 2780      | 16.4     | 34                 | 72        | 1340      | 1270      | 35        | 6.39     |
|                       | <100 кДа  | 7.09 | 6.54                     | 0.20                  | 2370      | 13.4     | 34                 | 67        | 1060      | 1215      | 37        | 6.19     |
|                       | <30 кДа   | 6.82 | 6.61                     | 0.21                  | 2590      | 12.6     | 30                 | 58        | 815       | 952       | 19        | 5.05     |
|                       | <5 кДа    | 6.78 | 6.63                     | 0.20                  | 2240      | 9.4      | 35                 | 68        | 969       | 1125      | 17        | 5.88     |
| 6 нед                 | <0.45 мкм | 8.19 | 4.18                     | 0.10                  | 298       | 36.3     | 6.6                | 40        | 498       | 377       | 21        | 0.67     |
|                       | <100 кДа  | 7.93 | 4.05                     | 0.11                  | 398       | 31.8     | 3.7                | 34        | 173       | 355       | 15        | 0.61     |
|                       | <30 кДа   | 8.05 | 4.00                     | 0.10                  | 195       | 13.8     | 2.2                | 24        | 98        | 261       | 5         | 0.33     |
|                       | <5 кДа    | 7.80 | 3.86                     | 0.10                  | 92        | 11.2     | 2.0                | 20        | 62        | 213       | 5         | 0.29     |
| 9 нед                 | <0.45 мкм | 8.11 | 5.19                     | 0.02                  | 181       | 9.7      | 6.9                | 26        | 806       | 191       | 16        | 0.69     |
|                       | <100 кДа  | 7.59 | 4.95                     | 0.02                  | 152       | 9.2      | 7.4                | 25        | 769       | 181       | 10        | 0.70     |
|                       | <30 кДа   | 7.68 | 5.08                     | 0.02                  | 124       | 7.6      | 6.4                | 23        | 588       | 164       | 5         | 0.62     |
|                       | <5 кДа    | 7.52 | 4.97                     | 0.02                  | 74        | 7.1      | 5.8                | 26        | 488       | 164       | 5         | 0.58     |
| <i>М2, Швеция</i>     |           |      |                          |                       |           |          |                    |           |           |           |           |          |
| Исходный              | <0.45 мкм | 7.57 | 3.55                     | 0.14                  | 46        | 0.7      | б                  | в         | 18        | 72        | г         | 0.27     |
|                       | <100 кДа  | 7.50 | 3.36                     |                       | 35        | 0.7      | б                  | в         | 32        | 75        | г         | 0.34     |
|                       | <30 кДа   | 7.54 | 3.47                     |                       | 30        | 2.0      | б                  | в         | 29        | 69        | г         | 0.25     |
|                       | <5 кДа    | 7.79 | 3.38                     | 0.13                  | 26        | 0.4      | б                  | в         | 27        | 58        | г         | 0.38     |
| 24 нед                | <0.45 мкм | 7.58 | 3.09                     | 0.01                  | 41        | 6.0      | б                  | в         | 62        | 56        | г         | 0.27     |
|                       | <100 кДа  | 7.52 | 2.96                     |                       | 38        | 15.0     | б                  | в         | 58        | 56        | г         | 0.17     |
|                       | <30 кДа   | 7.62 | 2.98                     |                       | 31        | 18.0     | б                  | в         | 57        | 59        | г         | 0.20     |
|                       | <5 кДа    | 7.76 | 3.02                     | 0.01                  | 30        | 33.0     | б                  | в         | 64        | 69        | г         | 0.26     |
| Исходный <sup>е</sup> | <0.45 мкм | 7.4  | 2.45                     | 0.03                  | 43        | н.о.     | 0.001 <sup>д</sup> | 3.4       | 0.3       | 17.8      | 0.7       | 0.01     |

<sup>а</sup> ЭП – электрическая проводимость.

<sup>б-д</sup> Ниже предела обнаружения 0.5, 10, 5 и 0.001 мкг/л соответственно.

<sup>е</sup> Концентрация фильтрата в тесте с колонкой при  $L/S = 10$  л/кг.

дила гумификация отходов. Концентрация меди в этот период возросла в 3.5 раза, по-видимому, в результате комплексообразования с растворенным органическим углеродом (РОУ). Для М2 исходные и конечные значения Cr, Pb и Cd были ниже пределов обнаружения. Отметим, что авторы [10] наблюдали статистически значимое увеличение экстрагируемых водой Zn, Pb, Cr, Ni и Cd во время зимнего компостирования ТКО с повышенной стабилизацией, но в случае меди это имело место только для экстракции с гораздо более сильным экстрагентом (ЭДТА). В работе [22] показателем изменения подвижности меди при выщелачивании из колонки является снижение ее концентрации на три порядка в тесте с колон-

кой при  $L/S$  10 л/кг по сравнению с фильтратом исходного образца М2.

Значения химического потребления кислорода (ХПК) материала М1 составляли 11700, 7900, 880 и 590 мг O<sub>2</sub>/л для образцов после начала и 2, 6 и 9 недель компостирования соответственно (после 0.45-мкм фильтрации). Значения БПК<sub>5</sub> составляли 6105, 4216, 47 и 48 мг O<sub>2</sub>/л соответственно. Для М2 значения ХПК в фильтрате составляли 120 и 110 мг O<sub>2</sub>/л, БПК<sub>5</sub> – 13 и 4 мг O<sub>2</sub>/л для исходного и конечного материалов соответственно. Во время фильтрации pH изменялся, и концентрации ТМ в фильтрате в некоторых случаях увеличивались.

**Таблица 2.** Сводная информация о качестве фильтратов из полигонов/экспериментальных секций, содержащих необработанные или подвергнутые различным режимам компостирования МСОО [19]

| Поступление отходов                     | МСОО   | Компостируемые МСОО, различные источники |        |      |      |      |      |
|---|--------|--|--------|------|------|------|------|
|   |        | Период компостирования (недели)          |        |      |      |      |      |
| Интенсивное                             | 0      | 0  | 4      | 4    | 2    | 16   | 3    |
| Повторное                               | 0      | 0  | 9      | 43   | 1    | 8    | 19   |
| Компонент                               |        |  |        |      |      |      |      |
| ХПК, мг О <sub>2</sub> /л               | 172000 | 19400                                    | 2780   | 1170 | 540  | 4000 | 1900 |
| БПК <sub>5</sub> , мг О <sub>2</sub> /л | 123000 | 9400                                     | 52     | 9    | 158  | 111  | 14   |
| Аммонийный N, мг/л                      | 3965   | 4200                                     | 197    | 11   | 56   | 292  | 340  |
| Хлорид, мг/л                            | 9100   | 6500                                     | 11 300 | 6900 | 5700 | 6200 | 4100 |
| Хром, мг/л                              | 0.41   | 1.3                                      | 0.14   | 0.04 | 0.03 | 0.21 | 0.09 |
| Никель, мг/л                            | 2.10   | 0.45                                     | 0.23   | 0.71 | 0.16 | 0.40 | 0.09 |
| Медь, мг/л                              | 1.41   | 0.33                                     | 0.71   | 0.80 | 0.28 | 0.52 | 0.18 |
| Цинк, мг/л                              | 102    | 0.56                                     | 3.4    | 1.0  | 0.22 | 1.6  | 1.2  |

*Характеристики фильтратов с полигонов, где захоронены продукты механической обработки и биологической обработки*

В работе [19] изучены образцы фильтрата с полигонов ЕС, куда поступали механически отсортированные органические остатки (МСОО) и отходы механико-биологической обработки (СО). МСОО – это мелкая фракция (40 или 100 мм) остатков процесса механической сортировки, которая не может быть повторно использована или переработана. Фильтраты из отходов МСОО имеют очень высокий потенциал загрязнения, но дальнейшая биологическая обработка этих отходов позволяет избежать пика ацетогенной фазы разложения и производить фильтраты аналогичные или более слабые, чем на обычных полигонах в метаногенной стадии разложения отходов. Эффективные процессы МБО также могут значительно снизить концентрацию органических загрязнителей и аммонийного N в фильтратах.

Отмечается, что сведения по качеству фильтрата для монополигонов СО ограничены, поскольку обычно СО захоранивают совместно в различных пропорциях с необработанными ТКО, МСОО или коммерческими и промышленными отходами. Наиболее вероятно совместное удаление СО с ТКО или МСОО до тех пор, пока не станет доступной значительная специальная инфраструктура для СО, по крайней мере, на местном уровне.

В табл. 2 содержатся основные сводные данные, собранные в [19] из опубликованных источников в странах ЕС, для фильтратов из МСОО, либо захороненных без обработки, либо предварительно компостируемых различными способами.

Результаты типичны для многих других исследований и демонстрируют: а) очень высокую активность фильтратов из необработанных МСОО при захоронении на полигоне; б) улучшение качества фильтрата, достигаемое обработкой отходов компостированием в различной степени, которое способно исключить появление начальных активных органических фильтратов, образующихся во время ацетогенной стадии разложения, и способствовать более быстрому формированию метаногенных условий.

Очевидно, что достигнутая степень компостирования и эффективность отдельных процессов не могут быть определены просто на основании продолжительности интенсивного и повторного компостирования, выполняемого в каждом месте. Например, на одном объекте, включенном в табл. 2, применялось только 2 недели интенсивного и еще 1 неделя повторного компостирования, но на практике это обеспечило существенное улучшение качества фильтрата.

Основные выводы из этих и других опубликованных исследований фильтратов из захороненных СО заключаются в следующем [19]:

- МСОО могут производить фильтраты с более высоким потенциалом загрязнения, чем фильтраты с обычных полигонов в ацетогенной или метаногенной стадии разложения отходов;
- компостирование таких отходов может снизить потенциал органического загрязнения со стороны как фильтрата, так и свалочного газа, благодаря предотвращению пика ацетогенной фазы разложения;
- концентрации аммонийного N в фильтратах СО могут быть схожими или значительно ниже, чем в фильтратах с обычных полигонов в метано-

**Таблица 3.** Общее описание категорий участков полигонов, с которых получены образцы фильтратов СО [19]

| Тип поступающих отходов | Молодые отходы (<5 лет)                          | Старые отходы (>5 лет) | Диапазон исторических данных <sup>а</sup> |
|-------------------------|--|------------------------|---|
| МСОО                    | Нет образцов <sup>б</sup>                        | Образец 1              | 14–23 лет                                 |
| >50% СО <sup>в</sup>    | Нет образцов                                     | Образец 4              | 5–27 лет                                  |
|                         |  | Образец 2              | 10–18 лет                                 |
| >90% СО                 | Образец 7<br>Образец 6<br>Образец 5<br>Образец 3 |                        | н.д.                                      |
|                         |  |                        | 0–3 года                                  |
|                         |  |                        | н.д.                                      |
|                         |  |                        | н.д.                                      |

<sup>а</sup> Временной диапазон исторических данных о качестве фильтрата, доступных для точки опробования. Не всегда охватывает период до настоящего времени. Диапазон представляют собой период с того момента, как на этом участке началось захоронение отходов; н.д. – данные недоступны.

<sup>б</sup> Образцы фильтрата из недавно размещенных МСОО не получены, в первую очередь потому, что в последние годы редко использовались полигоны для прямого захоронения необработанных МСОО.

<sup>в</sup> Участки, на которые поступает >50%, но <90% СО. Образец 4 – с участка, получавшего 80% СО, и образец 2 – с участка, получавшего 50–60% СО.

генной стадии, т.е. повышается вероятность того, что во время компостирования может происходить, в разной степени, процесс удаления или истощения азота;

– полигоны, принимающие СО, будут представлять риск для подземных вод аналогичным обычным полигонам ТКО, которые стали метаногенными, и, вероятно, потребуются аналогичный период времени, прежде чем отпадет необходимость активного управления полигоном и обработки фильтрата.

*Состав фильтратов на полигонах отходов ЕС, содержащих СО*

Авторы [19] провели также собственные исследования образцов фильтрата на полигонах отходов ЕС, содержащих МСОО, в том числе компостированные. Образцы были получены в ходе двух отдельных посещений, в течение февраля и июля 2002 г. Во всех случаях образцы фильтратов отбирались из скважин, отстойников или трубопроводов, которые часто и регулярно прокачивались, чтобы избежать опробования застойных фильтратов. Ни один образец не был отфильтрован и не отстаивался каким-либо образом. Цель состояла в том, чтобы представить, насколько это возможно, общее качество фильтрата, который может быть разгружен с такого участка. На практике уровни взвешенных веществ были относительно низкими во всех образцах.

Категории участков, с которых были получены образцы фильтрата, представлены в табл. 3. В таблице обозначены образцы, отобранные с разных участков, а также указан временной диапазон исторических данных по основной химии фильтратов в каждом месте, где был получен образец.

Аналитические результаты для санитарных параметров и металлов представлены в табл. 4. Результаты подтверждают, что захоронение необработанных отходов МСОО, которые, как правило, включают в себя наиболее разлагаемые фракции ТКО, может привести к образованию высокоактивных фильтратов на некоторых участках полигона. Концентрации аммонийного N в диапазоне 4000–6000 мг/л являются типичными для фильтратов с таких участков [19].

Полученные с различных полигонов репрезентативные образцы фильтрата продемонстрировали, что при применении эффективных современных процессов компостирования захоронение обработанных МСОО может привести к значительному снижению их биологической активности и, как следствие, к образованию более стабильных и менее активных фильтратов. Значения БПК<sub>5</sub> могут быть ниже 10 мг O<sub>2</sub>/л даже в фильтратах из отходов, захороненных всего несколько месяцев или лет назад. Концентрации аммонийного N могут быть такими же, как и в коммунальных сточных водах (<40 мг/л) и даже < 5 мг/л на предприятиях, очень успешно проводящих компостирование. Влияние нитрификации/денитрификации, включения в стабильные органические фракции, возможно, связанного с повышенными значениями “жесткой” ХПК (не биоразлагаемого ОВ), и других процессов требуют дальнейшего изучения.

Влияние процессов компостирования на последующее выделение аммонийного N с фильтратами из захороненного продукта очевидно [19]. В табл. 4 видно, что в фильтратах из отходов, претерпевших более интенсивную МБО, отношение аммонийного N к хлориду может резко снижаться. Степень, в которой происходит удаление азота во время самого процесса компостирова-

**Таблица 4.** Результаты для санитарных параметров и металлов в фильтрах полигонов отходов ЕС, отобранных в ходе исследования [19]

| Поступление отходов             | МСОО        | Компостируемые МСОО, различные источники |        |                        |        |           |                     |
|---------------------------------|-------------|--|--------|------------------------|--------|-----------|---------------------|
| Процессы компостирования        | Отсутствуют | Пассивные штабели                        |        | Переваливаемые штабели |        | Контейнер | Контейнер + штабели |
| Номер образца                   | 1           | 2  | 3      | 4                      | 5      | 6         | 7                   |
| Период компостирования (нед)    |             |  |        |                        |        |           |                     |
| Интенсивное                     | 0           | 0  | 0      | 0                      | 0      | 16        | 2                   |
| Добавочное                      | 0           | 12                                       | 30     | 25                     | 8      | 0         | 30                  |
| Компонент                       |             |  |        |                        |        |           |                     |
| ХПК                             | 15590       | 582                                      | 4670   | 228                    | 1620   | 869       | 1020                |
| БПК <sub>20</sub>               | 7840        | >157                                     | 843    | 82                     | 130    | 59        | 24                  |
| БПК <sub>5</sub>                | 4240        | 46                                       | 202    | 3                      | 35     | 6         | 3                   |
| Общий органический С            | 4694        | 180                                      | 1480   | 78                     | 543    | 308       | 340                 |
| Жирные кислоты (как С)          | 707         | <20                                      | <10    | <20                    | <10    | <10       | <10                 |
| Аммонийный N                    | 4024        | 195                                      | 1130   | 286                    | 197    | 34.2      | 1.8                 |
| Окисленный N                    | <1          | 10.3                                     | <1     | 16.1                   | <1     | 7.3       | 5.0                 |
| Фосфат (P)                      | 8.2         | 1.1                                      | 12.4   | 0.3                    | 2.8    | 0.4       | 0.3                 |
| Сульфат (SO <sub>4</sub> )      | 423         | 433                                      | 117    | 18                     | 449    | 414       | 878                 |
| Хлорид                          | 6000        | 612                                      | 2270   | 384                    | 2290   | 901       | 1090                |
| Отношение NH <sub>4</sub> -N/Cl | 0.671       | 0.319                                    | 0.498  | 0.745                  | 0.086  | 0.038     | 0.002               |
| ЭП                              | 39400       | 4960                                     | 14 000 | 3210                   | 9540   | 4860      | 5900                |
| Щелочность                      | 1740        | 879                                      | 6120   | 1100                   | 2010   | 1670      | 895                 |
| pH                              | 8.3         | 8.1                                      | 8.3    | 7.9                    | 7.9    | 8.4       | 8.5                 |
| Натрий                          | 4080        | 509                                      | 1520   | 419                    | 1250   | 622       | 789                 |
| Магний                          | 77          | 91                                       | 88     | 47                     | 104    | 64        | 67                  |
| Калий                           | 1310        | 328                                      | 728    | 211                    | 777    | 393       | 387                 |
| Кальций                         | 27          | 122                                      | 176    | 84                     | 329    | 232       | 255                 |
| Хром                            | 13100       | 110                                      | 870    | <50                    | <250   | <250      | <250                |
| Марганец                        | 380         | 460                                      | 1380   | 320                    | 2940   | 1450      | 1610                |
| Железо                          | 4310        | 960                                      | 19 500 | 1050                   | 13 900 | 2590      | 1310                |
| Никель                          | <100        | 30                                       | 210    | <10                    | <50    | <50       | <50                 |
| Медь                            | 325         | 22                                       | 374    | 6                      | 89     | 55        | 152                 |
| Цинк                            | 174         | 115                                      | 1032   | <5                     | 232    | 225       | 705                 |
| Кадмий                          | <60         | <6                                       | <30    | <6                     | <30    | <30       | <30                 |
| Свинец                          | <500        | <50                                      | <250   | <150                   | <250   | <250      | <250                |
| Мышьяк                          | <50         | 18                                       | 61     | <10                    | <10    | <1        | <10                 |
| Ртуть                           | <1          | <1                                       | <1     | <1                     | <1     | <10       | <1                  |

Примечание. ХПК и БПК в мгО<sub>2</sub>/л; TM и железо в мкг/л; щелочность в мг/л СаСО<sub>3</sub>, ЭП (электрическая проводимость) в мкСм/см, pH и отношение NH<sub>4</sub>-N/Cl – безразмерные. Все остальные результаты приведены в мг/л.

ния, пока не установлена. Также неясно, в какой степени компостирование способно минерализовать азотные соединения до нитратов, которые впоследствии превращаются в газообразный азот на бескислородном анаэробном полигоне.

Однако в фильтрах даже после самых лучших процессов компостирования при МБО, исследованных и опробованных, были обнаружены высокие значения “жесткой” ХПК. Обычно они находятся в диапазоне 1000–4000 мгО<sub>2</sub>/л и часто



**Таблица 5.** Исходные данные для диапазонов концентраций санитарных параметров и металлов в фильтрах из захороненных отходов МСОО и СО [19]

| Степень компостирования:            | Нет         |              | Высокая   |        | Низкая—средняя |
|-------------------------------------|-------------|--------------|-----------|--------|----------------|
| Стадия при опробовании:             | Ацетогенная | Метаногенная | Начальная | Позже  | Общий диапазон |
| рН                                  | 6           | 8            | 7.5       | 8      | 7.5–8.5        |
| ЭП                                  | 40000       | 40000        | 6000      | 10000  | 10000–20000    |
| ХПК                                 | 150000      | 10000        | 2000      | 1500   | 1000–5000      |
| БПК <sub>5</sub>                    | 100000      | 4000         | 50        | 30     | 20–200         |
| Общий органический С                | 50000       | 4000         | 500       | 500    | 500–2000       |
| Хлорид                              | 8000        | 6000         | 1000      | 2000   | 4000–8000      |
| Сульфат (как SO <sub>4</sub> )      | 1000        | 400          | 500       | 500    | 1000–5000      |
| Фосфат (как Р)                      | 10          | 20           | 0.5       | 3.0    | 1.0–15         |
| Щелочность (как CaCO <sub>3</sub> ) | 20000       | 18000        | 1000      | 2000   | 2000–6000      |
| Аммонийный N                        | 4000        | 4000         | 30        | 200    | 50–1000        |
| Общий N по Кьельдалю                | 4200        | 4200         | 40        | –      | 100–1300       |
| Общий окисленный N                  | <1          | <1           | 5         | <1     | <1             |
| Натрий                              | 4000        | 4000         | 800       | 1200   | 2000–4000      |
| Магний                              | 1000        | 100          | 60        | 100    | 100–400        |
| Калий                               | 2000        | 2000         | 400       | 800    | 1000–2000      |
| Кальций                             | 6000        | 50           | 250       | 300    | 100–800        |
| Хром                                | 0.6         | 5            | 0.05      | 0.1    | 0.1–0.5        |
| Марганец                            | 1.0         | 0.5          | 2         | 3      | 1–2            |
| Железо                              | 300         | 5            | 2         | 10     | 5–20           |
| Никель                              | 1           | 0.5          | 0.1       | 0.1    | 0.1–0.7        |
| Медь                                | 0.5         | 0.5          | 0.2       | 0.2    | 0.2–0.5        |
| Цинк                                | 10          | 0.5          | 0.5       | 0.2    | 0.5–3.0        |
| Кадмий                              | 1           | <0.001       | 0.003     | 0.003  | 0.005–0.1      |
| Свинец                              | 0.3         | <0.1         | 0.02      | 0.04   | 0.1–0.4        |
| Мышьяк                              | 0.04        | 0.1          | 0.004     | 0.006  | 0.01–0.1       |
| Ртуть                               | 0.0001      | 0.0001       | 0.0001    | 0.0001 | 0.0001–0.01    |

Примечание. Все результаты приведены в мг/л, кроме значения рН, ЭП (мкСм/см), ХПК и БПК (мг O<sub>2</sub>/л). Результаты представляют собой типичные значения, полученные из ряда исходных данных. Начальная стадия для фильтратов из отходов с высоким уровнем предварительной МБО обычно составляет до 2 или 3 лет.

выше, чем для полигонов, находящихся в метаногенной стадии, несмотря на значения БПК, которые часто составляют менее 100 мг O<sub>2</sub>/л. Остается определить, сколько лет или десятилетий такие фильтраты будут по-прежнему образовываться на полигонах, содержащих СО, подвергнутые современным процессам компостирования [19].

Подготовлена обобщенная таблица исходных данных по концентрациям санитарных параметров и металлов в фильтрах из МСОО и СО (табл. 5). Эти значения могут использоваться в качестве общей базы данных для оценки рисков, связанных с подземными водами, и в качестве инструмента, позволяющего разработать соот-

ветствующие схемы управления фильтратом на полигонах, принимающих СО.

Для сравнения в [19] приводятся данные о составе фильтратов с крупнейших полигонов обычных ТКО Великобритании, находящихся в метаногенной стадии разложения отходов (не показаны). По этим данным и из табл. 5 можно заключить, что по сравнению с фильтрами полигонов обычных ТКО фильтраты СО высокой степени переработки характеризуются низкими значениями ХПК и БПК, концентрации NH<sub>4</sub>–N. Содержание Ni ниже, а Cu, Zn и Cd выше, но примерно того же порядка. Таким образом, СО не

представляют собой опасности при захоронении на полигоне.

### РАСТВОРЕННЫЙ ОРГАНИЧЕСКИЙ УГЛЕРОД КАК ПРИБЛИЖЕННЫЙ ПОКАЗАТЕЛЬ ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ МЕТАЛЛОВ ИЗ СО

РОУ фильтрата из компостируемых отходов состоит из различных частей труднорастворимого органического вещества. В зависимости от возраста в фильтратах отходов наблюдается различное распределение фракций с высокой и низкой молекулярной массой [9]. Было установлено, что комплексы с РОУ объясняют наблюдаемые концентрации Pb и Cu в подземных водах, загрязненных фильтратом. Аналогичные результаты получены для Ni и Zn, а также Cd. Было показано, что в почве органический материал имел в 6–13 раз большую сорбционную способность для Cd, Cu и Zn, чем минеральные компоненты почвы [22].

Многие авторы изучали высвобождение ЗВ из богатых органическим веществом отходов (обычно с помощью статических тестов выщелачивания и методов последовательной экстракции), и были получены различные результаты, поскольку существует несколько переменных факторов, влияющих на выщелачивание. Это происхождение биоразлагаемых отходов, тип процесса, используемого для их биостабилизации, исходное содержание металлов и органических веществ, условия pH и т.д. Важный и общий вывод, сделанный в этих исследованиях, заключался в том, что помимо pH, который влияет на растворимость ТМ в матрицах, богатых органическим веществом, ключевым фактором в переносе неорганических компонентов в водную фазу является образование растворимых и нерастворимых комплексов с органическим веществом [15].

#### *Результаты статических и динамических тестов*

В последние несколько десятилетий для определения способности отходов к выщелачиванию использовались различные лабораторные и натурные эксперименты в зависимости от целей исследования и других факторов (экономических, временных ограничений и т.д.). Лабораторные тесты позволяют выявить закономерности процессов выщелачивания, а крупномасштабные реакторы и экспериментальные секции полигонов дают более близкие к реальным условиям количественные характеристики. Самый простой, быстрый и наиболее часто используемый тест – статический тест выщелачивания. Тем не менее разовые статические тесты дают представление о выщелачиваемости металла в конкретных экспериментальных условиях, но не позволяют экстраполировать его долгосрочное поведение. Такие

тесты обычно используются как простой инструмент для проверки соответствия нормативам или контроля качества.

В настоящее время для моделирования в лаборатории потока воды через материал и эволюции ЗВ в фильтрате в течение длительного периода времени более подходящими считаются инфильтрационные тесты с колонками. Это обусловлено главным образом различиями в условиях перемешивания и разбавления в двух указанных тестах, поскольку появление ЗВ в жидкости зависит не только от его *общего* количества, присутствующего в вымываемом твердом материале, но также от *доступного* количества и кинетики выщелачивания. Несмотря на то что доступное количество компонента обычно оценивается с помощью статического теста выщелачивания, информация, собранная таким образом, является лишь частичной, так как сведения о кинетике высвобождения отсутствуют. С другой стороны, и тесты с колонкой, и статические тесты выщелачивания требуют уменьшения размера частиц материала, что приводит к завышению оценки загрязнения фильтрата из-за увеличения контактной поверхности [17]. Несмотря на это, оба теста используются для установления экологических нормативов, включая, например, ограничения на допуск отходов на полигоны [11].

Комбинация статических тестов выщелачивания и тестов с колонкой была проведена, например, в работе [18]. Образцы СО были отобраны в точке разгрузки конвейерной ленты из установки вторичной переработки в течение трех различных кампаний в течение 2013 г. Эти образцы обозначены СО1 (февраль), СО2 (апрель) и СО3 (ноябрь). Состав образцов приведен в [5, 18]. В табл. 6 показано среднее содержание компонентов, измеренное в элюатах *статических тестов выщелачивания* ( $L/S = 10$  л/кг), проведенных на проанализированных образцах СО, в виде отношения высвободившейся в элюат массы компонента к массе исходного образца.

По результатам, представленным в табл. 6, можно заметить, что, хотя образцы СО имеют относительно высокое содержание ТМ, только небольшое количество металлов фактически выщелачивалось в условиях экспериментов (естественный pH, температура окружающей среды) и, следовательно, было доступно в окружающей среде. Например, для СО1 общее содержание Cr составляло 18.8 мг/кг СВ, тогда как выщелоченный Cr, определенный в статическом тесте, составлял 0.47 мг/кг СВ, что соответствует очень низкому проценту высвобождения (2.5%). Относительно низкая доступность, наблюдаемая для различных металлов, по-видимому, связана с процессом аэробного компостирования, который может усилить комплексование металлов в твер-

**Таблица 6.** Результаты статических тестов выщелачивания, проведенных с раствором 0.001 М CaCl<sub>2</sub> на образцах СО (среднее значение выделившейся в раствор массы компонента к массе образца ± стандартное отклонение) [18]

| Параметр                        | СО1         | СО2         | СО3         |
|---------------------------------|-------------|-------------|-------------|
| pH                              | 6.5         | 6.8         | 7           |
| РОУ (г/кг СВ)                   | 25.7 ± 0.9  | 16.2 ± 0.3  | 14.1 ± 0.6  |
| Cl <sup>-</sup> (г/кг СВ)       | 7.3 ± 0.1   | 7.2 ± 0.2   | 5.3 ± 0.3   |
| <i>Макроэлементы (г/кг СВ)</i>  |             |             |             |
| Al                              | 0.03 ± 0.00 | 0.03 ± 0.01 | 0.01 ± 0.00 |
| Ca                              | 7.8 ± 0.3   | 6.0 ± 0.8   | 4.5 ± 0.1   |
| Fe                              | 0.05 ± 0.00 | 0.07 ± 0.01 | 0.02 ± 0.00 |
| K                               | 2.6 ± 0.0   | 3.8 ± 0.5   | 2.5 ± 0.1   |
| Mg                              | 0.7 ± 0.0   | 0.7 ± 0.1   | 0.4 ± 0.0   |
| Na                              | 3.0 ± 0.0   | 3.8 ± 0.0   | 2.9 ± 0.1   |
| <i>Микроэлементы (мг/кг СВ)</i> |             |             |             |
| Ba                              | 7.8 ± 1.2   | 18.2 ± 3.8  | 10.8 ± 0.4  |
| Co                              | 0.24 ± 0.01 | 0.24 ± 0.02 | 0.10 ± 0.04 |
| Cr                              | 0.47 ± 0.09 | 0.81 ± 0.07 | 0.48 ± 0.02 |
| Cu                              | 5.03 ± 0.05 | 5.91 ± 0.45 | 3.68 ± 0.13 |
| Li                              | 0.29 ± 0.01 | 0.16 ± 0.01 | 0.08 ± 0.04 |
| Mn                              | 15.0 ± 0.4  | 0.2 ± 0.5   | 4.9 ± 0.2   |
| Mo                              | 0.42 ± 0.10 | 0.33 ± 0.06 | 0.24 ± 0.01 |
| Ni                              | 2.2 ± 0.1   | 2.5 ± 0.1   | 1.6 ± 0.1   |
| Pb                              | 3.4 ± 0.2   | 3.3 ± 0.4   | 1.1 ± 0.0   |
| V                               | 0.16 ± 0.01 | 0.32 ± 0.02 | 0.18 ± 0.01 |
| Zn                              | 37.8 ± 1.1  | 45.4 ± 4.6  | 25.0 ± 0.9  |

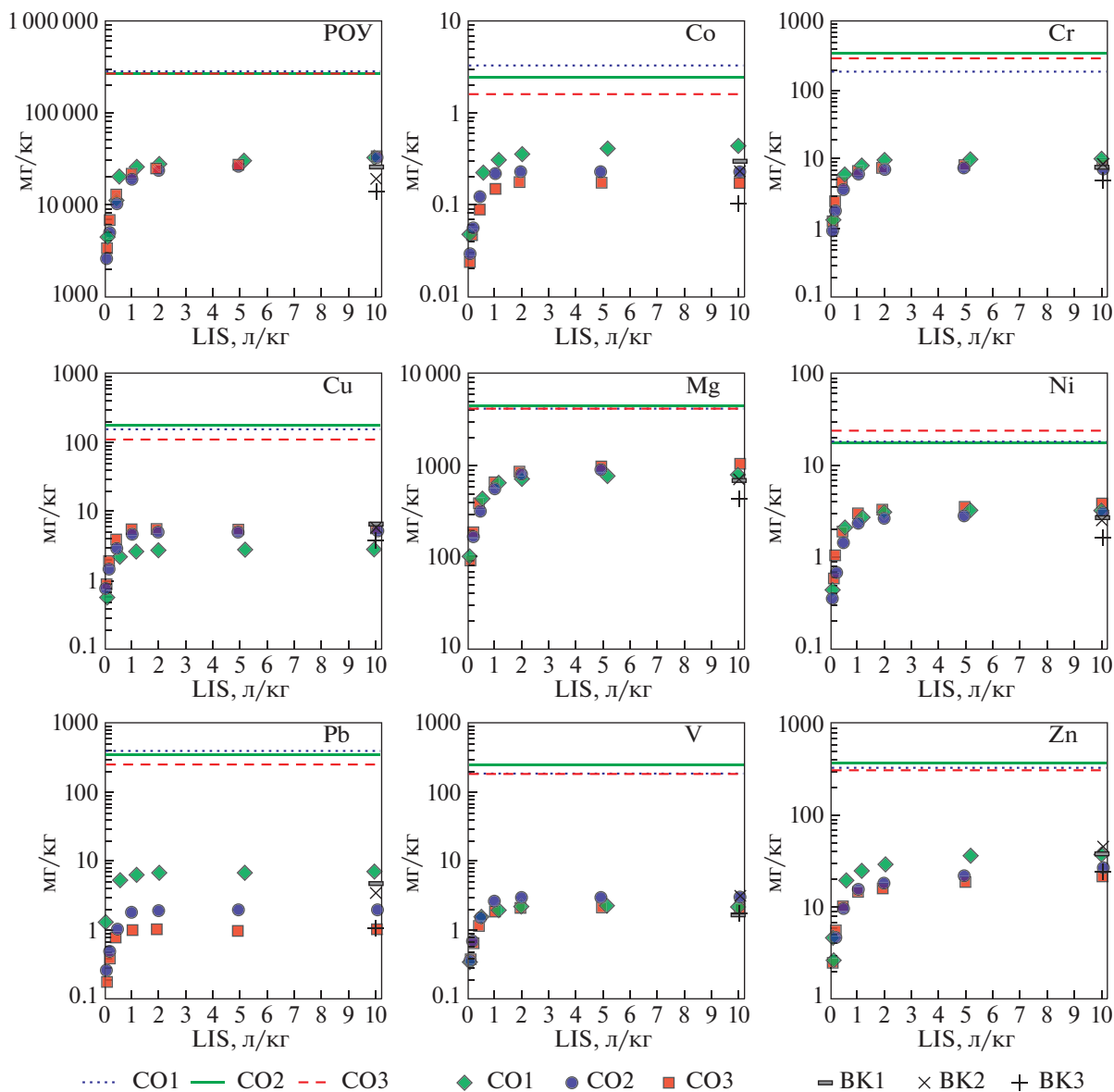
дой матрице. Фактически широко признано, что растворимость и биодоступность большинства металлов снижаются в ходе развития биологического процесса, поскольку они могут быть прочно связаны с остаточным органическим материалом в более устойчивой форме [18].

Чтобы оценить влияние отношения *L/S* на высвобождение ЗВ, были проведены *инфильтрационные тесты с колонкой* с восходящим потоком. На рис. 1 показано совокупное высвобождение массы компонента (мг/кг СВ образца) в раствор (как функция отношения *L/S* для РОУ и ТМ), наблюдаемое в различных тестах с колонкой, а также представлены общее содержание (линии) и результаты статических тестов выщелачивания, проведенных с раствором 0.001 М CaCl<sub>2</sub> (символы -, +, ×, *L/S* = 10 л/кг). Хотя были определены многие элементы, для краткости внимание было сосредоточено на выщелачивании РОУ, Со, Сг, Сu, Mg, Ni, Pb, V и Zn, поскольку они показали наиболее значимые результаты.

По рис. 1 можно заметить, что, даже если СО являются неоднородным материалом, тенденции высвобождения массы компонента, полученные

в результате тестов с колонкой для различных образцов СО, весьма схожи. Это показывает, с одной стороны, аналогичное поведение образцов, отобранных в разных кампаниях, а с другой стороны, хорошую воспроизводимость тестов с колонкой и согласованность данных по выщелачиванию. Единственные исключения представлены Со и Pb (в меньшей степени Сu и Zn), которые показали более широкий разброс, предположительно из-за различий в составе образцов СО.

Тенденции, представленные на рис. 1, также показывают, что совокупное высвобождение компонентов намного ниже общего содержания. А именно, при сравнении общего высвобождения каждого металла, полученного в тестах с колонкой, с общим содержанием в образце, очевидно, что в подвижное состояние переходит лишь небольшое количество этих металлов, по крайней мере, если условия окружающей среды (pH, температура) аналогичны тестируемому. Фактически, процент высвобождения составлял около 11–13% для РОУ, 7–11% для Zn, 2–5% для Сг и Сu и <1% для Pb и V. Наибольшая подвижность наблюдалась для Ni и Со с высвобождением до 15–



**Рис. 1.** Общее содержание (линии, CO1, CO2, CO3) и совокупное высвобождение элементов в тестах с колонкой (символы CO1, CO2 и CO3). Символы BK1, BK2, BK3 показывают высвобождение компонентов, определенное в ходе серийных тестов выщелачивания, проведенных с раствором 0.001 M CaCl<sub>2</sub> [18].

19% и 9–13% соответственно. Кроме того, по рис. 1 можно также заметить, что совокупные концентрации POY, Co, Cr, Mg и Ni, полученные в конце тестов с колонкой (соответствующие отношению  $L/S$ , равному 10 л/кг), явно выше, чем те, которые получены в статических тестах выщелачивания (при том же  $L/S$ ).

Это означает, что, вероятно, статический тест может недооценить фактическое высвобождение ЗВ из этого типа отходов. Такой результат может быть связан с большей продолжительностью эксперимента с колонкой по сравнению со статическим тестом (2–3 нед вместо 24 ч). Более того, при динамическом тесте с колонкой происходит

постоянное обновление выщелачивающего раствора, которое поддерживает движущую силу выщелачивания [18].

#### *Корреляции концентраций металлов с POY*

Результаты построения в [18] профилей pH и концентраций POY Co, Cr и V в растворе как функций отношения  $L/S$  (не показаны) позволили отметить, что профили элюирования Co, Cr и V следовали тенденции очень сходной с тенденцией, наблюдаемой для POY. То есть в этом конкретном случае подвижность этих металлов, вероятно, будет больше зависеть от содержания POY,

чем от рН. Фактически во время всех тестов с колонкой рН образца показывал небольшие изменения по сравнению с исходным значением рН этих материалов (например, с рН, определенным в статическом тесте и представленным в табл. 6). Зафиксированные во время тестов с колонкой значения рН были очень близки к исходным значениям рН, различия не превышали  $\pm 0.5$  единицы. Следовательно, рН не может быть использован для объяснения высвобождения различных компонентов. Напротив, наблюдается четкое соответствие между концентрациями металлов и РОУ в элюатах, показывая, что высвобождение металлов по существу отражает выщелачивание РОУ. Ранее отмечалось, что существенное влияние на миграционную способность металлов оказывает органическое вещество свалочных отложений [1].

Чтобы проверить гипотезу о связи выщелачивания металлов с РОУ, результаты статических тестов и тестов с колонкой были объединены для получения информации о корреляции между концентрацией металлов и РОУ.

На рис. 2 концентрации Co, Cr, Cu, Mg, Ni, Pb, V и Zn в элюате представлены как функции измеренного РОУ в тесте с колонкой и в статических тестах. Как видно на этих графиках, наблюдалась сильная линейная корреляция между РОУ и концентрациями металлов ( $R^2 > 0.8$ ), за исключением Pb, который показал меньшую зависимость от РОУ. Эти данные свидетельствуют о том, что указанные элементы в основном высвобождались в виде органических соединений из-за образования комплексов ТМ с растворенными органическими веществами [18]. Отметим, что в исследовании [16] среди показанных на рис. 2 микроэлементов для Pb наблюдался наибольший захват минеральными коллоидами ( $> 70\%$  – концентрация микроэлемента в неочищенном фильтрате по сравнению с фракцией ниже 1 кДа).

Фактически широко признано, что в богатых органическими веществами материалах, таких как осадок сточных вод и биоотходы, РОУ является одним из ключевых факторов, контролирующих высвобождение ТМ (особенно Cu, Cr, Ni и Zn), благодаря их высокой растворимости и способности к образованию устойчивых растворимых органических комплексов. Например, авторы [7] исследовали подвижность ТМ в осадке сточных вод и показали, что Ni и Cu легко выщелачивались и сильно коррелировали с РОУ, тогда как Zn имел тенденцию адсорбироваться твердой фазой. В работе [24] была обнаружена сильная положительная корреляция между РОУ и Cr. Авторы [6] показали, что повышение концентрации РОУ в почвах, удобренных осадком сточных вод, приводит к увеличению доступности Cr и Zn. Был сделан вывод, что РОУ оказывает значительное

влияние на подвижность ТМ и, вероятно, конкурирует с твердыми поверхностями за их адсорбцию, что приводит к более высоким концентрациям металлов в растворе. Проводя эксперименты с колонкой с загрязненной почвой, авторы [23] наблюдали, что увеличение подвижности Cu управляется РОУ, тогда как подвижность Zn в основном определяется Ca и в меньшей степени РОУ. Результаты, представленные в [8], показали высокое сродство Cu, Ni и Pb к РОУ из-за образования сложных органических соединений. Эти результаты подтверждают существование сильной линейной зависимости между указанными элементами и растворимостью органического вещества, особенно при  $pH > 6$ .

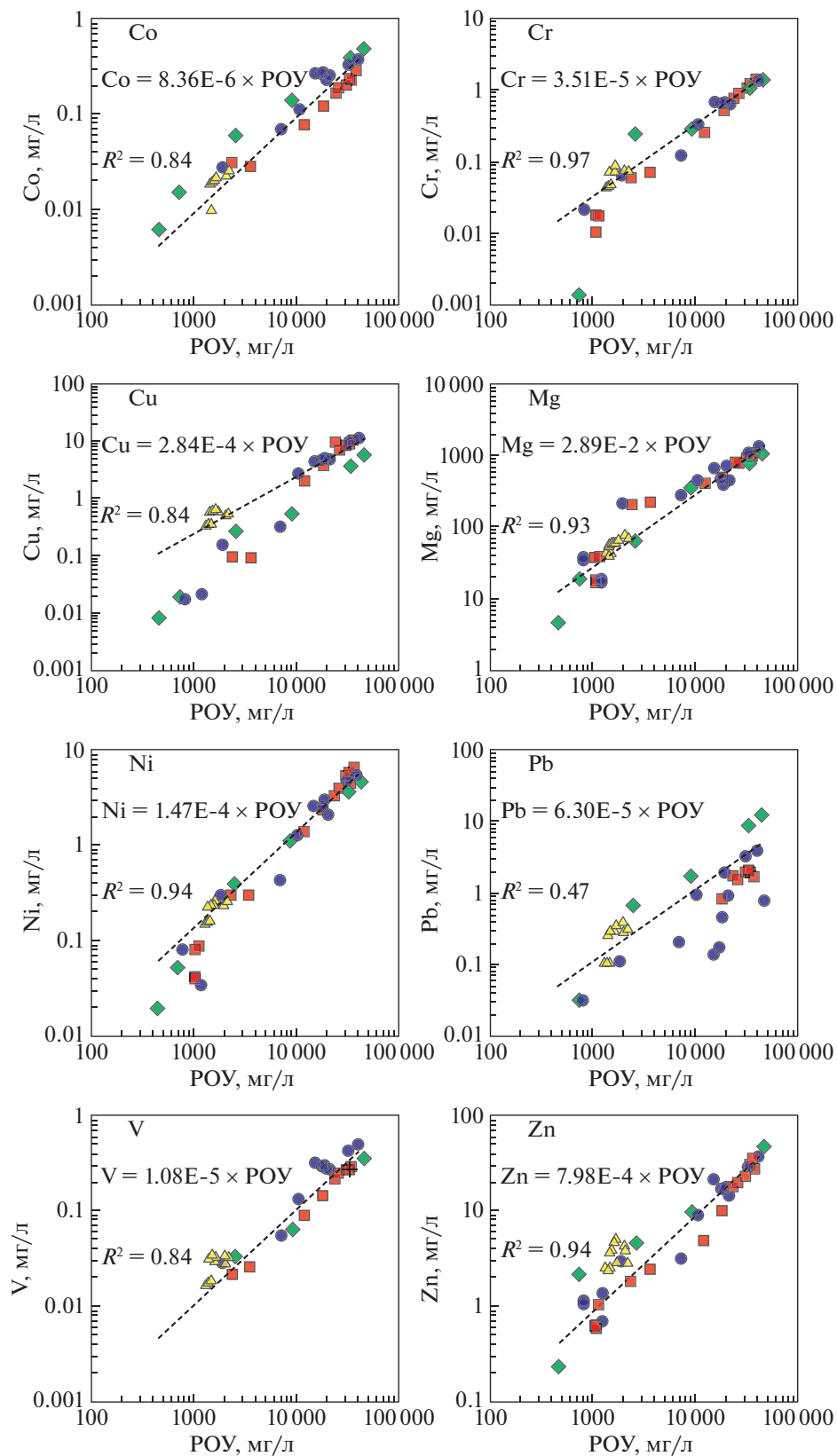
Следовательно, полученные результаты (см. рис. 2) согласуются с вышеупомянутыми исследованиями богатых органическими веществами материалов. Основываясь на этих результатах, можно предположить, что концентрации металлов изменяются пропорционально РОУ. Высвобождение металла может быть промоделировано как функция РОУ через коэффициент пропорциональности ( $K_{РОУ, Me}$ ) между металлом (Me) и РОУ:

$$[Me] = K_{РОУ, Me} \times [РОУ]. \quad (1)$$

Коэффициент  $K_{РОУ, Me}$  был рассчитан для каждого металла путем интерполяции всех данных, полученных в результате тестов серии и с колонкой, выполненных на образцах СО (48 образцов). Полученные значения  $K_{РОУ, Me}$  вместе с коэффициентами детерминации ( $R^2$ ) также показаны на рис. 2 [18].

Аналогичные результаты представлены в работе [13] с более широким набором СО (табл. 7). Используемые данные относятся к образцам компостирования исходных разделенных органических отходов и к СО из остаточных смешанных ТКО. Кроме того, включены результаты тестов с инфильтрационной колонкой с отходами, отобранными в конце их биологической стабилизационной обработки на предприятии МБО (продолжительностью 28 сут) и подвергнутыми дальнейшему этапу выдерживания, продолжавшемуся 6 мес. Это расширило набор данных, благодаря анализу обработанных богатых органическими веществами отходов с разной степенью биологической стабилизации.

Представленные результаты могут означать, что в тех случаях, когда наблюдается сильная корреляция высвобождения металла с РОУ, практически весь металл в растворе закомплексован РОУ. Аналогичный вывод был сделан в работе [3] на основе анализа химического состава фильтрата Воронежского полигона ТКО (возраст 5 лет, стадия ацидофикации). Расчеты позволили сделать предположение о полной закомплексованности ионов металлов в фильтрате этого полигона.



**Рис. 2.** Корреляция между концентрациями POY и Co, Cr, Cu, Mg, Ni, Pb, V и Zn в тестах с колонкой (символы как на рис. 1) и в статических тестах (треугольники). Пунктирные линии представляют линии регрессии, предполагающие нулевое значение для точки пересечения (см. уравнение (1)) [18].



**Таблица 7.** Статистика эмпирического коэффициента пропорциональности между металлом и РОУ ( $K_{РОУ, Me}$ ) [13]

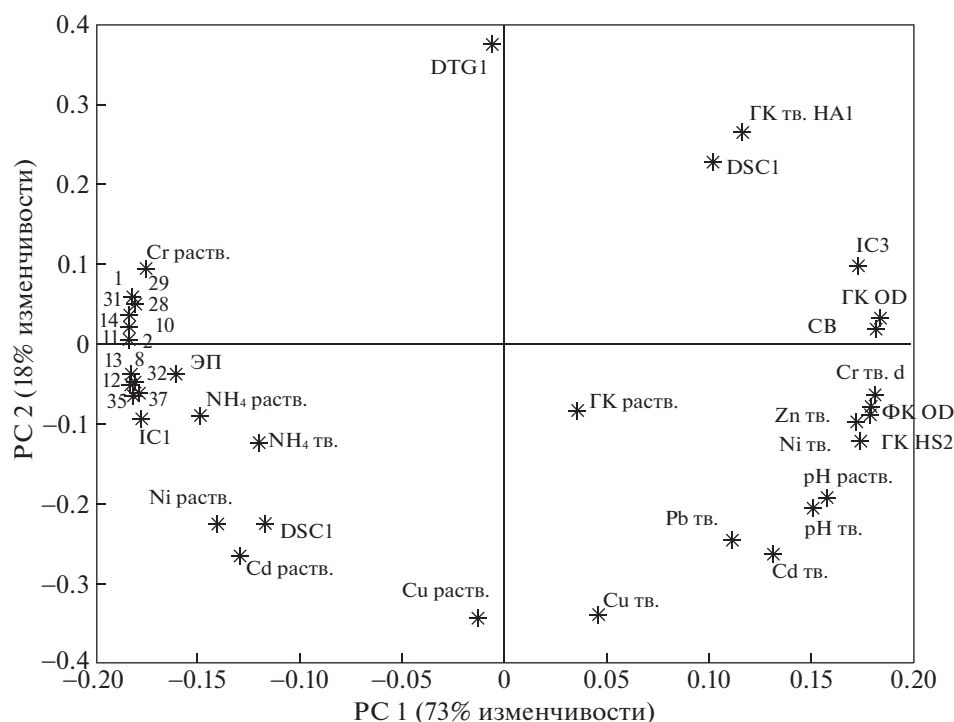
| Характеристика            | Al      | Ba      | Cr      | Cu      | Mo      | Ni      | Pb      | V       | Zn      |
|---------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Число образцов            | 106     | 117     | 131     | 130     | 83      | 133     | 126     | 97      | 135     |
| 25-й процентиль           | 4.0E-04 | 8.2E-05 | 2.6E-05 | 1.5E-04 | 7.7E-06 | 5.5E-05 | 5.5E-05 | 9.2E-06 | 5.6E-04 |
| Медиана (50-й процентиль) | 9.1E-04 | 1.5E-04 | 6.9E-05 | 2.9E-04 | 2.1E-05 | 1.7E-04 | 1.4E-04 | 2.4E-05 | 8.8E-04 |
| 75-й процентиль           | 1.8E-03 | 3.7E-04 | 1.2E-04 | 5.7E-04 | 8.1E-05 | 3.7E-04 | 2.8E-04 | 3.6E-05 | 1.1E-03 |

**АНАЛИЗ ПОКАЗАТЕЛЕЙ  
ВЫЩЕЛАЧИВАЕМОСТИ ЗВ ИЗ СО  
МЕТОДОМ ГЛАВНЫХ КОМПОНЕНТОВ  
И ВОЗМОЖНОСТИ ЗАХОРОНЕНИЯ СО**

Были выявлены взаимосвязи параметров, определяющих потенциальные эмиссии из двух видов СО из Германии и Швеции (см. выше табл. 1) [22]. Значения параметров, полученные в результате анализа общего содержания и характеристик фильтрата М1 (Германия), были проанализированы статистически методом главных компонент (РСА). Это многомерный статистический метод, который позволяет уменьшить избыточность в данных. Полученный преобразованный набор данных преимущественно имеет меньшую размерность без потери большей части исходной информации, содержащейся во входных данных.

РСА для М1 привел к трем главным компонентам, объясняющим 72, 18 и 9% дисперсии исходных данных соответственно. На так называемом графике нагрузок отображается ковариация переменных (рис. 3, отдельно на рис. 4 в увеличенном масштабе показана левая центральная часть рис. 3). Параметры стабилизации АТ<sub>4</sub> и ВР<sub>21</sub> находятся в той же четверти, что и ХПК, РОУ, БПК<sub>5</sub>, и близки к ним (см. рис. 4). РОУ, БПК<sub>5</sub> и ВР<sub>21</sub> перекрываются и, таким образом, демонстрируют почти одинаковую дисперсию. Это означает, что параметры РОУ, БПК<sub>5</sub> и ВР<sub>21</sub> могут использоваться как взаимозаменяемые.

Растворимые Pb, Zn и, в меньшей степени, Cr на графике нагрузок фильтрата расположены близко к РОУ, что указывает на ковариацию этих параметров. Cd и Cu в фильтрате имеют разные нагрузки, особенно во втором главном компоненте, и находятся в нижней левой четверти.



**Рис. 3.** График нагрузок PCA на материале М1 [22]. DTG1, DSC1, DSC3, IC1, IC3 – результаты термических анализов, OD, HA1, HS2 – методы анализа гумусовых веществ.

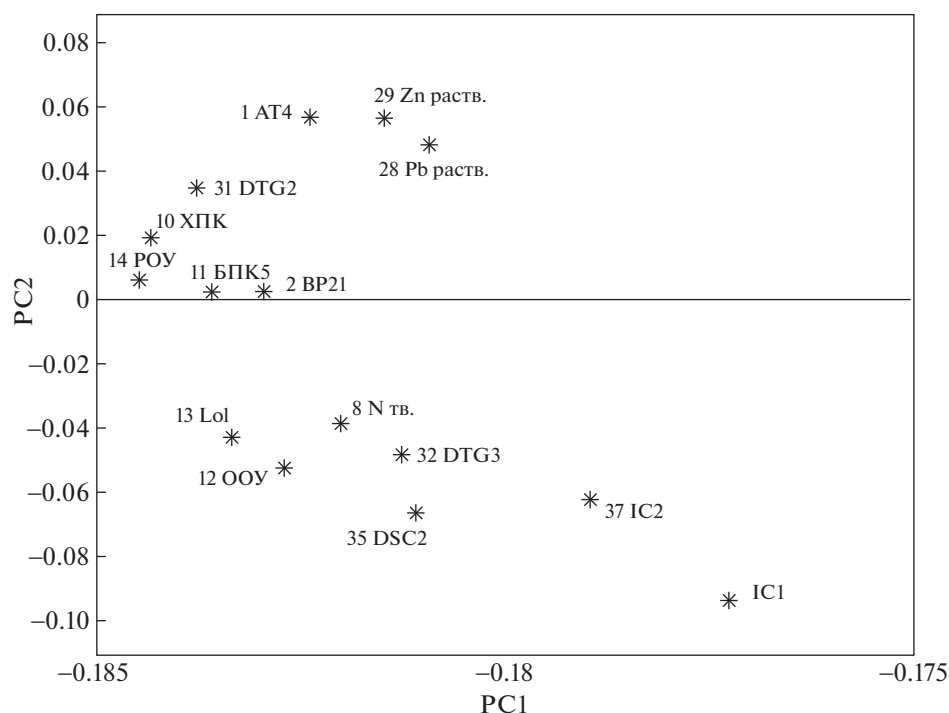


Рис. 4. Увеличенная часть графика с рис. 3 [22]. DTG2, DTG3, DSC2, IC1, IC2 – результаты термических анализов.

Общий органический углерод (ООУ) и потери при прокаливании (LoI) перекрываются и создают отдельный кластер. Все нагрузки твердых фаз ТМ существенно отличаются от их соответствующих концентраций в фильтрате (противоположные знаки внутри первого или первого и второго главных компонентов).

Концентрация ГК имеет положение на графике нагрузок вблизи Zn, Cr и Ni для твердых фаз и, в меньшей степени, даже для Cd, Pb и Cu. Это позволяет предположить возможное сродство этих ТМ к твердым ГК [22]. Отметим, что авторы [10] обнаружили, что повышенное содержание ТМ имеет место одновременно с высокой степенью разложения компостов из ТКО.

Что касается измеренных параметров в твердых образцах и образцах фильтрата в работе [22], то М1 после 9 нед биообработки, а также необработанный и биообработанный М2 могут быть захоронены на полигоне для неопасных отходов в Германии (класс II), будучи классифицированы как СО. За исключением потерь при прокаливании и твердого ООУ, биообработанный образец М2 соответствует критериям приемлемости для полигонов класса I и, за дополнительным исключением для Ni в фильтрате, даже для свалок инертных отходов в Германии (класс 0).

Обработанные отходы М2 могут быть захоронены на полигоне для неопасных отходов в Швеции. Из-за ООУ М1 не мог бы быть захоронен в

Швеции после 9 нед биообработки. Однако это могло бы стать возможным после более длительной обработки. Что касается индекса микробного дыхания АТ4, то М1 будет соответствовать ограничениям, установленным ЕС, уже через 6 нед, если вступит в силу норматив 10 мг О<sub>2</sub>/г СВ.

Необработанные отходы М2 показывают индекс дыхания уже ниже предельного значения 5 мг О<sub>2</sub>/г СВ для Германии, а концентрации РОУ и ТМ ниже предела выщелачивания для Швеции, который должен приниматься на полигонах для инертных отходов. Следовательно, в отношении эмиссии газов и фильтрата, происходящих из органических веществ, предельное значение 3% для инертных отходов и 10% по весу в качестве исключения для органических отходов для неопасных свалок в Швеции не будет достигнуто в случае М2 (для обсуждения предполагается, что М2 либо захоронен, либо использован в качестве покровного слоя поверх неопасной свалки, ниже дренажного слоя в последнем покрытии, и в этом случае фильтрат будет собираться вместе с фильтратом от покрываемых отходов). Отходы М2 можно было бы с ограничениями использовать для строительства даже в Дании, соседней стране с усиленными критериями повторного использования отходов и загрязненной почвы для строительных целей [22].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В последние десятилетия значительную роль в управлении отходами играет их механико-биологическая обработка (МБО) посредством аэробного компостирования и/или анаэробного сбраживания. Продуктом МБО являются биостабилизированные отходы (СО), оказывающие меньшее воздействие на окружающую среду. При этом понимание состава фильтрата является ключевым вопросом для оценки долгосрочного воздействия в случае использования или захоронения СО.

В СО из Германии и Швеции в ходе МБО в фильтрате снижались концентрации почти всех ТМ, за исключением меди. Во время зимнего компостирования ТКО с повышенной стабилизацией отмечалось статистически значимое увеличение экстрагируемых водой Zn, Pb, Cr, Ni и Cd. В фильтратах образцов, подвергнутых более длительной обработке, подвижные гуминовые кислоты составляют большую долю в РОУ.

На примере СО из Италии показаны преимущества предварительной обработки отходов в снижении нагрузки фильтрата аммонийным N. Наиболее тщательно обработанные отходы демонстрируют наименьшие начальные и остаточные потенциальные нагрузки загрязнения. Концентрации аммонийного N в фильтратах СО могут быть аналогичными или значительно ниже, чем у метаногенных фильтратов с обычных полигонов.

На примере исследования образцов фильтратов с различных полигонов ЕС показано, что применение эффективных процессов компостирования СО может способствовать значительному снижению их биологической активности и, как следствие, к образованию более стабильных и менее активных фильтратов. При обширном сравнении фильтратов СО высокой степени переработки с фильтратами полигонов ТКО в Великобритании признано, что СО не представляют особой опасности при захоронении на полигоне.

Однако даже после самых лучших процессов компостирования в некоторых фильтратах были обнаружены высокие значения “жесткой” ХПК (обычно в диапазоне 1000–4000 мг/л, часто более высокие, чем в метаногенных фильтратах, несмотря на значения БПК, которые часто составляют менее 100 мг/л). Остается определить, сколько лет или десятилетий такие фильтраты будут по-прежнему образовываться на полигонах, содержащих СО, подвергнутые современным процессам компостирования.

Представленные диапазоны концентраций санитарных параметров и металлов в фильтратах СО могут использоваться в качестве общей базы данных для оценки рисков, связанных с подземными водами, и в качестве инструмента для раз-

работки схем управления фильтратом на полигонах, которые будут принимать СО.

Исследовано поведение при выщелачивании образцов биологически обработанных отходов, собранных на предприятии МБО в Италии, с применением различных статических тестов и динамических тестов выщелачивания с колонкой с восходящим потоком. Было отмечено, что статический тест, который является методом проверки соответствия нормативам, может недооценивать фактическое высвобождение РОУ и Co, Cr, Mg и Ni из рассмотренного типа отходов. Это может быть связано, с одной стороны, с большей продолжительностью теста с колонкой по сравнению со статическим тестом, с другой стороны — с различными условиями экспериментов, влияющих на выщелачивание металлов (например, непрерывное обновление в колонке выщелачивающего раствора, которое может поддерживать движущую силу выщелачивания). Проведенные на различных образцах СО тесты с колонкой предоставили надежные результаты и полезную информацию о кинетике выщелачивания компонентов, что позволило выделить ключевые параметры, определяющие их подвижность.

По результатам лабораторных тестов сделан важный общий вывод, что помимо pH, который влияет на растворимость ТМ, в матрицах, богатых органическим веществом, роль твердого и растворенного органического вещества можно рассматривать как ключевой фактор в переносе неорганических компонентов в водную фазу через образование растворимых и нерастворимых комплексов. При сравнении профилей элюирования РОУ с профилями некоторых металлов наблюдалось очевидное сходство их поведения при выщелачивании. Это позволило предположить, что РОУ играет ключевую роль в выщелачивании этих металлов, вероятно, из-за его высокой растворимости и его сродства к образованию устойчивых комплексов с металлами. Имела место сильная линейная корреляция ( $R^2 > 0.8$ ) между РОУ и концентрациями многих металлов в элюатах. Путем комбинации результатов статических тестов и тестов инфильтрации в колонках с восходящим потоком получены коэффициенты распределения между металлом и РОУ, специфичные для каждого элемента. Представленные результаты могут означать, что при наличии сильной корреляция высвобождения металла с РОУ, практически весь металл в растворе закомплексован РОУ. Необходимы дальнейшие исследования для лучшего понимания механизмов, управляющих высвобождением металлов, и форм их выщелачивания, например, путем проведения тестов на выщелачивание в зависимости от pH, последовательной экстракции для определения состава металлов, а также фракционирования РОУ.

Анализ показателей выщелачиваемости металлов статистическим методом главных компонентов позволил раскрыть взаимосвязи параметров, определяющих потенциальные эмиссии из двух видов СО из Германии и Швеции. Показано, что параметры РОУ, БПК<sub>5</sub> и ВР<sub>21</sub> в наибольшей степени связаны с первым главным компонентом и могут использоваться как взаимозаменяемые. Посредством лабораторных экспериментов определено, что увеличение стабилизации путем компостирования предпочтительно определяется снижением дыхательной активности АТ<sub>4</sub>. Также прослеживается тенденция стабилизации фильтратов со снижением ХПК, РОУ и БПК<sub>5</sub>. Общее содержание органического углерода менее точно отражает стабилизацию. ООУ и LoI перекрываются и создают отдельный кластер. Все нагрузки твердых фаз ТМ существенно отличаются от их соответствующих концентраций в фильтрате. Концентрация ГК имеет положение на графике нагрузок вблизи твердых фаз Zn, Cr и Ni и, в меньшей степени, Cd, Pb и Cu. Это позволяет предположить возможное сродство этих ТМ к твердым ГК. Подвижность Cr, Ni, Pb и Zn, полученных при статических тестах выщелачивания деионизированной водой, снижалась за счет биобработки материалов, а подвижность Cu однозначно увеличивалась. Анализ фильтратов методом главных компонентов показывает сродство Cu к подвижным ГК или РОУ. Высокое содержание Cr, Zn и Ni в твердой фазе сочетается с высоким содержанием твердых ГК. В меньшей степени это справедливо и для содержания твердых Cd, Cu и Pb. Указанные различия во взаимодействии неподвижных и подвижных ГВ с ТМ требуют дальнейшего внимания, для разработки индивидуальных схем мониторинга отходов МБО и оптимизации процессов обработки для достижения желаемого качества.

Анализ измеренных параметров в твердых образцах и образцах фильтрата из Германии и Швеции показал, что оба рассмотренных образца СО могут быть захоронены на полигоне для неопасных отходов в Германии (класс II). Образец из Германии соответствует критериям приемлемости (за исключением LoI и твердого ООУ) для полигонов класса I и (за дополнительным исключением Ni в фильтрате) даже для свалок инертных отходов в Германии (класс 0). По индексу АТ<sub>4</sub> этот образец будет соответствовать ограничениям, установленным ЕС, уже через 6 нед, если вступит в силу норматив 10 мг О<sub>2</sub>/г СВ. Образец из Швеции может быть захоронен на полигоне для неопасных отходов. Этот материал можно было бы с ограничениями использовать для строительства даже в Дании, стране с усиленными критериями повторного использования отходов.

Таким образом, процессы МБО могут снизить как органическую нагрузку, так и концентрации аммонийного N в фильтратах на полигонах, а также общее массовое высвобождение этих и других загрязняющих веществ. Концентрации металлов в фильтрате СО могут быть выше, чем в целом на полигоне, но примерно одного порядка. Необходимо на каждом предприятии МБО регулировать технологию, как механической, так и биологической обработки поступающих отходов для достижения приемлемого для захоронения качества СО, используя лабораторные эксперименты по выщелачиванию. Тогда полигоны, принимающие СО, будут представлять опасность для подземных вод, аналогичную обычным полигонам ТКО, которые стали метаногенными, и, следовательно, потребуются аналогичный период времени, прежде чем отпадет необходимость активного управления полигоном и обработки фильтрата. Прогнозирование продолжительности этого периода на конкретном полигоне требует детальных исследований.

Отдельный интерес представляют проводившиеся в Европе полномасштабные эксперименты по выделению ЗВ из СО: в больших реакторах и экспериментальных секциях полигонов. Результаты этих экспериментов во многом отличаются от полученных в лаборатории. Эти исследования будут рассмотрены в дальнейшем.

*Автор благодарит к.х.н. В.С. Путилину за внимание к этой работе и полезные замечания.*

*Статья подготовлена в рамках выполнения государственного задания ИГЭ РАН по теме НИР № г.р. 122022400104-2 “Техногенез и природа: геоэкологические проблемы” и при финансовой поддержке гранта РФФИ № 20-05-00574.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Галицкая И.В., Путилина В.С., Юганова Т.И. Роль органического вещества в миграции тяжелых металлов на участках складирования твердых бытовых отходов // Геоэкология. 2005. № 5. С. 411–422.
2. Галицкая И.В., Путилина В.С., Юганова Т.И. Аммонийный азот в фильтрате полигонов ТКО: образование, трансформация, долгосрочность загрязнения // Геоэкология. 2021. № 1. С. 3–13.
3. Семин Е.Г., Бекренев А.В., Бекетов А.Ю., Батищев В.В. и др. Специфические особенности вод фильтратов полигонов по захоронению твердых бытовых отходов на примере Воронежского полигона // Городское хозяйство и экология. 1999. № 2. С. 34–59.
4. Тулохонова А.В., Уланова О.В. Оценка жизненного цикла интегрированных систем управления отходами. М.: Академия Естествознания, 2013. URL: <https://www.monographies.ru/ru/book/view?id=267> (дата обращения 17.03.2022).
5. Юганова Т.И. Продукты механико-биологической обработки твердых коммунальных отходов: состав, сравнение биоактивности с захороненными ТКО,

- тяжелые металлы // Геоэкология. 2022. № 3. С. 69–81.
6. *Antoniadis V., Alloway B.J.* The role of dissolved organic carbon in the mobility of Cd, Ni and Zn in sewage sludge-amended soils // *Environmental Pollution*. 2002. V. 117. № 3. P. 515–521.
  7. *Ashworth D.J., Alloway B.J.* Complexation of copper by sewage sludge-derived dissolved organic matter: effects on soil sorption behaviour and plant uptake // *Water, Air & Soil Pollution*. 2007. V. 182. № 1–4. P. 187–196.
  8. *Ashworth D.J., Alloway B.J.* Influence of dissolved organic matter on the solubility of heavy metals in sewage sludge-amended soils // *Communications in Soil Science & Plant Analysis*. 2008. V. 39. № 3–4. P. 538–550.
  9. *Calace N., Liberatori A., Petronio B.M., Pietrolletti M.* Characteristics of different molecular weight fractions of organic matter in landfill leachate and their role in soil sorption of heavy metals // *Environmental Pollution*. 2001. V. 113. № 3. P. 331–339.
  10. *Ciavatta C., Govi M., Simoni A., Sequi P.* Evaluation of heavy metals during stabilization of organic matter in compost produced with municipal solid wastes // *Bioresource Technology*. 1993. V. 43. № 2. P. 147–153.
  11. Council Decision of 19 December 2002 Establishing Criteria Procedures for the Acceptance of Waste at Landfills Pursuant to Article 16 of and Annex II to Directive 1999/31/EC / European Council. 2002. 23 p. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32003D0033&from=GA> (дата обращения 17.03.2022).
  12. *Kjeldsen P., Barlaz M.A., Rooker A.P., Baun A., Ledin A., Christensen T.H.* Present and long-term composition of MSW landfill leachate: A Review // *Critical Reviews in Environmental Science & Technology*. 2002. V. 32. № 4. P. 297–336.
  13. *Lieto A., Verginelli I., Zingaretti D., Lombardi F.* Total organic carbon as a proxy for metal release from biostabilized wastes // *Environmental Science & Pollution Research International*. 2020. 11 p. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11356-020-09960-1> (дата обращения 17.03.2022).
  14. *Lombardi F., Costa G., Sirini P.* Analysis of the role of the sanitary landfill in waste management strategies based upon a review of lab leaching tests and new tools to evaluate leachate production // *Revista Ambiente & Água*. 2017. V. 12. № 4. 13 p.
  15. *Lombardi F., Di Lonardo M.C., Lieto A., Sirini P.* Investigating the leaching properties of MBT wastes and composts from aerobic/anaerobic processes // *Revista Ambiente & Água*. 2018. V. 13. № 1. 14 p.
  16. *Matura M., Ettler V., Ježek J., Mihaljevič M., Šebek O., Sýkora V., Klementová M.* Association of trace elements with colloidal fractions in leachates from closed and active municipal solid waste landfills // *Journal of Hazardous Materials*. 2010. V. 183. P. 541–548.
  17. *Molleda A., López A., Cuartas M., Lobo A.* Release of pollutants in MBT landfills: Laboratory versus field // *Chemosphere*. 2020. V. 249. Article 126145.
  18. *Pantini S., Verginelli I., Lombardi F.* Analysis and modeling of metals release from MBT wastes through batch and up-flow column tests // *Waste Management*. 2015. V. 38. P. 22–32.
  19. *Robinson H.D., Knox K., Bone B.D., Picken A.* Leachate quality from landfilled MBT waste // *Waste Management*. 2005. V. 25. № 4. P. 383–391.
  20. *Siddiqui A.A., Richards D.J., Powrie W.* Investigations into the landfill behaviour of pretreated wastes // *Waste Management*. 2012. V. 32. № 7. P. 1420–1426.
  21. *Siddiqui A.A., Richards D.J., Powrie W.* Biodegradation and flushing of MBT wastes // *Waste Management*. 2013. V. 33. № 11. P. 2257–2266.
  22. *van Praagh M., Heerenklage J., Smidt E., Modin H., et al.* Potential emissions from two mechanically-biologically pretreated (MBT) wastes // *Waste Management*. 2009. V. 29. № 2. P. 859–868.
  23. *Zhao L.Y.L., Schulin R., Weng L., Nowack B.* Coupled mobilization of dissolved organic matter and metals (Cu and Zn) in soil columns // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2007. V. 71. № 14. P. 3407–3418.
  24. *Zheng G.D., Gao D., Chen T.B., Luo W.* Stabilization of nickel and chromium in sewage sludge during aerobic composting // *Journal of Hazardous Materials*. 2007. V. 142. № 1–2. P. 216–221.

## LEACHING OF POLLUTANTS OUT OF THE PRODUCTS OF MECHANICAL-BIOLOGICAL TREATMENT OF MUNICIPAL SOLID WASTE: LEACHATE COMPOSITION AND ADMISSIBILITY OF DISPOSAL AT MSW LANDFILLS

**T. I. Yuganova<sup>a,#</sup>**

<sup>a</sup> *Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences, Ulanskii per. 13, str. 2, Moscow, 101000 Russia*

<sup>#</sup>*E-mail: tigryu@gmail.com*

Parameters of leaching pollutants from the products of mechanical-biological treatment (MBT) of municipal solid waste (MSW) are considered. The evolution of the composition of filtrates during MBT has been studied. Treated waste with fresh and mature MSW was compared. This is important for assessing the risk of groundwater pollution from landfills receiving stabilized waste (SW). The admissibility of SW burial at MSW landfills was analyzed in accordance with the criteria adopted in some European countries. The relationship between leaching of dissolved organic carbon (DOC) and heavy metals (HMs) is considered, and a direct lin-

ear correlation is revealed for several HMs. The indicators of metal leaching were analyzed by the statistical method of principal components to reveal the relationship of parameters that determine potential emissions from SW. The analysis showed that Cu has affinity for mobile humic acids (HAs) or DOC, while Zn, Cr and Ni and, to a lesser extent, Cd, Pb and Cu have affinity for solid HAs. These differences in the interaction of immobile and mobile humic substances with HMs require further attention in order to develop individual schemes for monitoring MBT-waste and optimize treatment processes to achieve the desired quality of SW.

**Keywords:** municipal solid waste, mechanical-biological treatment, stabilized waste, leaching, leachate composition, organic matter, heavy metals, burial admissibility

## REFERENCES

- Galitskaya, I.V., Putilina, V.S., Yuganova, T.I. *Rol' organicheskogo veshchestva v migratsii tyazhelykh metallov na uchastkakh skladirovaniya tverdykh bytovykh otkhodov* [The role of organic matter in the migration of heavy metals in the areas of solid domestic waste storage]. *Geoekologiya*, 2005, no. 5, pp. 411–422. (in Russian)
- Galitskaya, I.V., Putilina, V.S., Yuganova, T.I. *Ammonitnyi azot v fil'trate poligonov TKO: obrazovanie, transformatsiya, dolgosrochnost' zagryazneniya* [Ammonium nitrogen in the leachate of MSW landfills: formation, transformation, and long-term pollution]. *Geoekologiya*, 2021, no. 1, pp. 3–13. (in Russian)
- Semin, E.G., Bekrenev, A.V., Beketov, A.Yu., Batishchev, V.V., et al. *Spetsificheskie osobennosti vod fil'tratov poligonov po zakhoroneniyu tverdykh bytovykh otkhodov na primere Voronezhskogo poligona* [Specific features of landfill leachate for the MSW disposal by the example of the Voronezh landfill]. *Gorodskoe khozyaistvo i ekologiya*, 1999, no. 2, pp. 34–59. (in Russian)
- Tulokhonova, A.V., Ulanova, O.V. *Otsenka zhiznennogo tsykla integrirovannykh sistem upravleniya otkhodami* [Life cycle assessment of integrated waste management systems]. Moscow, Academy of Natural Sciences, 2013. Available at: URL: <https://www.monographies.ru/ru/book/view?id=267> (accessed 17.03.2022). (in Russian)
- Yuganova, T.I. *Produkty mekhaniko-biologicheskoi obrabotki tverdykh kommunal'nykh otkhodov: sostav, sravnenie bioaktivnosti s zakhoronennymi TKO, tyazhelye metally* [Products of mechanical-biological treatment of municipal solid waste: composition, comparison of bioactivity with buried MSW, heavy metals]. *Geoekologiya*, 2022, no. 3, pp. 69–81. (in Russian)
- Antoniadis, V., Alloway, B.J. The role of dissolved organic carbon in the mobility of Cd, Ni and Zn in sewage sludge-amended soils, *Environmental Pollution*, 2002, vol. 117, no. 3, pp. 515–521.
- Ashworth, D.J., Alloway, B.J. Complexation of copper by sewage sludge-derived dissolved organic matter: effects on soil sorption behaviour and plant uptake. *Water, Air & Soil Pollution*, 2007, vol. 182, nos. 1–4, pp. 187–196.
- Ashworth, D.J., Alloway, B.J. Influence of dissolved organic matter on the solubility of heavy metals in sewage sludge-amended soils. *Communications in Soil Science & Plant Analysis*, 2008, vol. 39, nos. 3–4, pp. 538–550.
- Calace, N., Liberatori, A., Petronio, B.M., Pietrolletti, M. Characteristics of different molecular weight fractions of organic matter in landfill leachate and their role in soil sorption of heavy metals. *Environmental Pollution*, 2001, vol. 113, no. 3, pp. 331–339.
- Ciavatta, C., Govi, M., Simoni, A., Sequi, P. Evaluation of heavy metals during stabilization of organic matter in compost produced with municipal solid wastes. *Bioresource Technology*, 1993, vol. 43, no. 2, pp. 147–153.
- Council Decision of 19 December 2002 Establishing Criteria Procedures for the Acceptance of Waste at Landfills Pursuant to Article 16 of and Annex II to Directive 1999/31/EC / European Council, 2002, 23 p. Available at: URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32003D0033&from=GA> (accessed 17.03.2022).
- Kjeldsen, P., Barlaz, M.A., Rooker, A.P., Baun, A., Ledin, A., Christensen, T.H. Present and long-term composition of MSW landfill leachate: A Review. *Critical Reviews in Environmental Science & Technology*, 2002, vol. 32, no. 4, pp. 297–336.
- Lieto, A., Verginelli, I., Zingaretti, D., Lombardi, F. Total organic carbon as a proxy for metal release from biostabilized wastes. *Environmental Science & Pollution Research International*, 2020. 11 pp. Available at: URL: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11356-020-09960-1> (accessed 17.03.2022).
- Lombardi, F., Costa, G., Sirini, P. Analysis of the role of the sanitary landfill in waste management strategies based upon a review of lab leaching tests and new tools to evaluate leachate production. *Revista Ambiente & Água*, 2017, vol. 12, no. 4, 13 p.
- Lombardi, F., Di Lonardo, M.C., Lieto, A., Sirini, P. Investigating the leaching properties of MBT wastes and composts from aerobic/anaerobic processes. *Revista Ambiente & Água*, 2018, vol. 13, no. 1, 14 p.
- Matura, M., Ettler, V., Ježek, J., Mihaljevič, M., Šebek, O., Sýkora, V., Klementová, M. Association of trace elements with colloidal fractions in leachates from closed and active municipal solid waste landfills. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, vol. 183, pp. 541–548.
- Molleda, A., López, A., Cuartas, M., Lobo, A. Release of pollutants in MBT landfills: Laboratory versus field. *Chemosphere*, 2020, vol. 249, article 126145.
- Pantini, S., Verginelli, I., Lombardi, F. Analysis and modeling of metals release from MBT wastes through batch and up-flow column tests. *Waste Management*, 2015, vol. 38, pp. 22–32.



19. Robinson, H.D., Knox, K., Bone, B.D., Picken, A. Leachate quality from landfilled MBT waste. *Waste Management*, 2005, vol. 25, no. 4, pp. 383–391.
20. Siddiqui, A.A., Richards, D.J., Powrie, W. Investigations into the landfill behaviour of pretreated wastes. *Waste Management*, 2012, vol. 32, no. 7, pp. 1420–1426.
21. Siddiqui, A.A., Richards, D.J., Powrie, W. Biodegradation and flushing of MBT wastes. *Waste Management*, 2013, vol. 33, no. 11, pp. 2257–2266.
22. van Praagh, M., Heerenklage, J., Smidt, E., Modin, H., et al. Potential emissions from two mechanically-biologically pretreated (MBT) wastes. *Waste Management*, 2009, vol. 29, no. 2, pp. 859–868.
23. Zhao, L.Y.L., Schulin, R., Weng, L., Nowack, B. Coupled mobilization of dissolved organic matter and metals (Cu and Zn) in soil columns. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2007, vol. 71, no. 14, pp. 3407–3418.
24. Zheng, G.D., Gao, D., Chen, T.B., Luo, W. Stabilization of nickel and chromium in sewage sludge during aerobic composting. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, vol. 142, no. 1–2, pp. 216–221.

---

---

**ГРУНТОВЕДЕНИЕ  
И МЕХАНИКА ГРУНТОВ**

---

---

УДК 624.131.4

**ХАРАКТЕР ДЕФОРМИРОВАНИЯ ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ С ПОЗИЦИЙ  
ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ ЭФФЕКТИВНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ**© 2022 г. Ф. С. Карпенко<sup>1,\*</sup><sup>1</sup> *Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН,  
Уланский пер., 13, стр. 2, Москва, 101000 Россия**\*E-mail: kafs08@bk.ru*

Поступила в редакцию 10.10.2022 г.

После доработки 19.10.2022 г.

Принята к публикации 20.10.2022 г.

Рассматривается характер деформирования глинистых грунтов в различных условиях нагружения с позиций физико-химической оценки их строения. Показано, что деформационное поведение глин определяется не только величиной воздействующих на них внешних нагрузок, но, главным образом, величиной внутреннего взаимодействия между слагающими их глинистыми минеральными частицами. Характеристика деформирования глин может быть дана на основе сопоставительного анализа величины внешних напряжений, передаваемых на их структурные контакты, со значением реальной эффективной прочности и деформируемости. Такой анализ позволяет объяснить специфические особенности деформирования глинистых грунтов, противоречащие общепринятым теоретическим положениям механики грунтов, и дает возможность обоснованного прогноза их деформационного поведения в реальных условиях напряженного состояния при строительстве и эксплуатации инженерно-хозяйственных объектов и сооружений.

**Ключевые слова:** *структурные контакты, тип контакта, реальная эффективная прочность, реальная эффективная деформируемость*

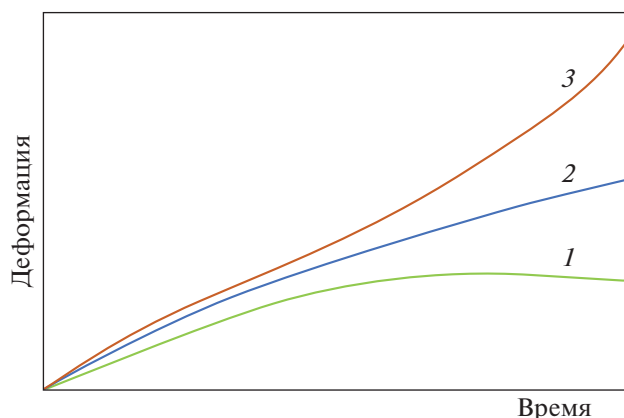
**DOI:** 10.31857/S0869780922060042**ВВЕДЕНИЕ**

Глинистые породы наиболее широко распространены среди других осадочных пород и наиболее часто становятся грунтами основания для фундаментов при строительстве, испытывая при этом воздействие различных нагрузок. Все это определяет необходимость изучения закономерностей деформационного поведения глинистых грунтов под действием нагрузок, причем особенно важны не только характеристики свойств глин в естественном залегании, но и прогноз их изменения в результате трансформации внутреннего строения глинистых грунтов в напряженном состоянии при строительстве и эксплуатации инженерных объектов, что и является одной из основных задач механики грунтов.

Наибольшее практическое значение для решения строительных задач имеют механические свойства грунтов: прочность и деформируемость, для определения которых в отечественной и зарубежной практике грунтоведения применяются общепринятые методики испытаний, базирующиеся на фундаментальных положениях классической механики сплошных сред — теории трения, пластичности и упругости. Прочность и де-

формируемость грунтов определяются как механические свойства материалов, и это в общем случае позволяет решать множество практических задач при проведении инженерно-геологических изысканий. Наряду с этим, за время исследований выявлено множество противоречий между теоретическими положениями и расчетами, с одной стороны, и реальным поведением глинистых грунтов под действием нагрузок — с другой, что в значительной степени связано с изменением строения грунтов в ходе проведения испытаний [1, 2, 4, 17 и др.].

Основная причина возникающих противоречий заключается в том, что с позиций современной научно-методической базы исследований глинистые грунты рассматриваются как сплошные упругие тела, а внутреннее строение глин и их реакция на действие внешних нагрузок не учитываются. В результате параметры прочности и деформируемости глинистых грунтов не имеют четкого понятийного смысла, характеризующего строение и свойства конкретного грунта, во многом их физический смысл оказывается условным, размытым, а количественные значения зависят от прилагаемых нагрузок, метода и схемы проведения испытаний и других условий.



**Рис. 1.** Кривые ползучести в глинистых грунтах: 1 — затухающая, 2 — установившаяся, 3 — прогрессирующая.

Современная методическая база определения механических свойств глинистых грунтов позволяет определять и фиксировать существующие противоречия, но в целом вопрос об их причинах и закономерностях проявления остается дискуссионным. Все это формирует предпосылки для разработки нового научно-методического направления изучения глинистых грунтов, в котором должны рассматриваться не только величины внешних нагрузок на грунт и их соотношение, но и оцениваться внутренние напряжения, действующие в самом грунте между его компонентами. Такой подход должен основываться на современных научных представлениях об условиях образования глин, закономерностях формирования и изменения их строения и свойств [13–16].

Основная цель настоящей работы — рассмотреть особенности деформационного поведения глинистых грунтов с позиций физико-химической теории эффективных напряжений при действии внешних нагрузок и продемонстрировать результаты практического проведения таких исследований.

### ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА

В соответствии с общепринятыми теоретическими положениями механики грунтов при действии нагрузок, не превышающих уровень линейной деформируемости, в грунтах протекают упругие деформации, переходящие при увеличении нагрузки в пластические. Пластические деформации протекают при повышении нагрузки до критического уровня, при достижении которого происходит физическое разрушение грунта. Многочисленные данные экспериментальных исследований показывают, что такая теоретическая схема не всегда позволяет объективно описать деформационное поведение глинистых грунтов. Во

многих случаях деформирование глин под действием докритических нагрузок отличается от описанного, особенно при длительном действии нагрузок. В практике инженерно-геологических исследований зафиксировано множество примеров такого рода, и наиболее значимые из них — процессы ползучести и вторичной консолидации.

Ползучесть — приращение деформаций во времени при неизменной действующей нагрузке, одна из важных особенностей деформирования глинистых грунтов, которая может проявляться в них при длительном нагружении. Изучением ползучести в грунтах, впервые описанной В. Вебером (1835), занимались Н.Н. Маслов, С.С. Вялов, М.Н. Гольдштейн, Н.А. Цытович, Ю.К. Зарецкий, З.Г. Тер-Мартirosян и другие исследователи. В основе описания процесса лежат положения теории ползучести механики сплошных сред. Исследования ползучести базируются в основном на определении вязкости грунтов, скорости и интенсивности ее проявления, напряженного состояния, пороговых значений напряжений.

Ползучесть может проявляться в глинистых грунтах при действии докритических нагрузок на различных этапах сдвиговой деформации, следующих после этапа условно-мгновенной деформации. В зависимости от характера приращения деформаций выделяют разные виды ползучести (рис. 1): затухающую, установившуюся, прогрессирующую. При этом развитие затухающей ползучести происходит при меньших, чем для установившейся, напряжениях сдвига, а прогрессирующей — при больших, чем для установившейся ползучести. Наиболее активно ползучесть может проявляться в грунтах твердой, тугопластичной консистенции. В мягкопластичных и текучих грунтах ползучесть практически не проявляется.

Ползучесть глинистых грунтов имеет большое значение для определения их свойств, прогноза развития деформаций в различных условиях нагружения. Поэтому исследование этих процессов, определение природы и причин их проявления, закономерностей их протекания крайне важны при исследовании свойств глин и изменения их строения в различном напряженном состоянии.

Важной особенностью глинистых грунтов является изменение их строения, проявляющееся в процессе консолидации (уплотнения) под действием внешней нагрузки. Такие изменения могут происходить непосредственно в процессе экспериментальных испытаний грунтов, что приводит к искажениям результатов исследований. Для описания процесса было введено понятие вторичной консолидации грунта, причины и природа которой остаются в значительной степени неясной. Ряд исследователей объясняют это явление

деформацией самих твердых частиц грунта в процессе нагружения [3], но это положение противоречит данным о прочности структурных элементов глинистых грунтов М.М. Филатова [18], Е.М. Сергеева [12], В.Д. Ломтадзе [8]. Проведенные ими опытные исследования показали, что прочность частиц глинистых минералов чрезвычайно высока, и они практически не разрушаются даже под действием огромных нагрузок, превышающих возможные нагрузки от инженерных сооружений, что говорит о том, что прочность глинистых систем определяется именно прочностью структурных связей.

Современные методы исследований позволяют фиксировать изменение строения и свойств глинистых грунтов под действием нагрузок. При этом природа, причина и закономерности таких явлений остаются во многом неопределенными, что обуславливает необходимость их дальнейшего изучения на основе научных представлений о строении и природе изменения свойств глин.

В основе современных научных представлений о строении глин лежит рассмотрение их как дисперсных систем, сложенных минеральными частицами глинистых минералов дисперсной фазы и водой, слагающей дисперсионную среду. Эти представления базируются на положениях фундаментальных теорий ДЛФО (сокр. от теории Дерягина, Ландау, Фервея, Овербека), двойного электрического слоя (ДЭС), теории контактных взаимодействий П.А. Ребиндера и теории расклинивающего действия Б.В. Дерягина. Эти базовые теории коллоидной и физической химии были развиты применительно к глинистым дисперсным грунтам В.И. Осиповым, В.Н. Соколовым, Н.А. Румянцевой [9–11, 13–16] и другими учеными и послужили основой физико-химической теории эффективных напряжений в грунтах. Эта теория описывает структурообразование глин за счет возникновения физико-химических связей в результате действия сил притяжения и отталкивания между частицами глинистых минералов и их взаимодействия с водой в ходе литогенеза, приводящего к формированию структурных контактов между минеральными частицами.

Общая характеристика энергетического взаимодействия в дисперсных системах, разработанная в рамках теории ДЛФО, отображается зависимостью результирующей величины действия сил притяжения и отталкивания частиц дисперсной фазы от расстояния между ними. Функция энергетического взаимодействия имеет два потенциальных минимума, отвечающих наиболее устойчивому и энергетически выгодному состоянию системы, разделенных и ограниченных энергетическими максимумами. Внешние напряжения, действующие на грунт, передаются на площадки контактов и концентрируются там, а

общая прочность глинистой дисперсной системы определяется суммарной прочностью отдельных контактов. Для ее характеристики В.И. Осиповым [10] были введены понятия реальной и общей эффективной прочности. Реальная эффективная прочность характеризует силу взаимодействия между частицами и определяется как величина реального эффективного напряжения  $\sigma''$  на контактах при их разрушении. Аналогично реальной эффективной прочности для глинистых грунтов может быть определена величина реальной деформируемости – максимальная величина реального эффективного напряжения  $\sigma''$  на контактах, при котором глины проявляют упругие свойства в результате преобладающего действия на контактах частиц сил притяжения между ними.

### МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Ранее автором [5, 6] была разработана методика экспериментального определения величины реального эффективного напряжения в глинах и на ее основе определены характеристики реальной эффективной прочности и деформируемости (данные приведены в табл. 1) различных разновидностей глинистых грунтов.

Анализ приведенных данных показывает, что для каждого грунта, в зависимости от преобладающего типа контактных взаимодействий в нем, выделяются три уровня напряжений, при превышении их реальным эффективным напряжением происходит резкое изменение строения и свойств грунта. Это уровни реальной эффективной деформируемости, реальной эффективной прочности и прочности, определенной по закону Мора–Кулона (рис. 2).

В условиях нагружения, при которых величина реального эффективного напряжения не превышает реальную эффективную деформируемость, преобладающие силы притяжения на контактах препятствуют перемещению частиц и направлены на возвращение дисперсной глинистой системы в исходное наиболее устойчивое равновесное энергетическое состояние потенциального минимума.

При нагрузке выше уровня реальной эффективной деформируемости дисперсная глинистая система попадает в зону преобладающего действия сил отталкивания на контактах. Действие сил отталкивания способствует перемещению и переориентации частиц, сжатию и утончению их гидратных пленок, и при достижении реальным эффективным напряжением величины реальной эффективной прочности происходит разрушение контактов.

При уровне предельных нагрузок на грунт, соответствующему закону Мора–Кулона, происхо-

**Таблица 1.** Реальная эффективная прочность и деформируемость контактов разновидностей глинистых грунтов

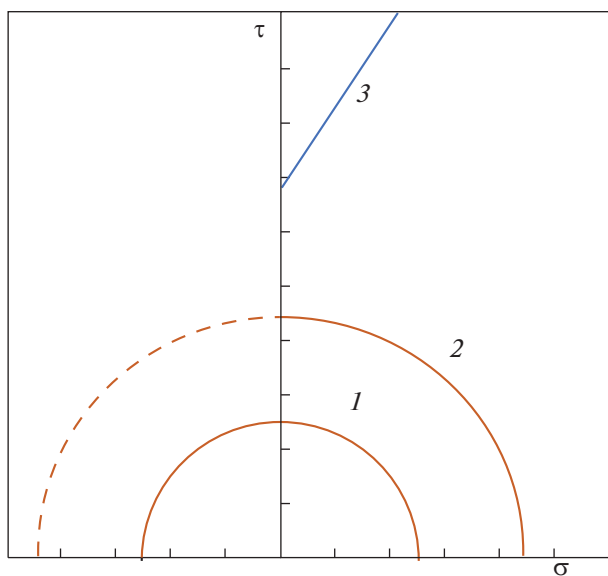
| Преобладающий минеральный состав глинистой фракции | Разновидность грунта по числу пластичности | В числителе – реальная эффективная прочность, в знаменателе – реальная эффективная деформируемость единичного контакта преобладающего типа, Н |   |   |
|--|--|---|---|---|
|  |  | переходного точечного   | ближнего коагуляционного                          | дальнего коагуляционного                          |
| Сапонит  | Глина тяжелая                              | $\frac{1.9 \times 10^{-09}}{6.4 \times 10^{-10}}$   | $\frac{4.7 \times 10^{-10}}{2.1 \times 10^{-10}}$ | $\frac{9.7 \times 10^{-11}}{4.6 \times 10^{-11}}$ |
| Монтмориллонит                                     |  | $\frac{1.7 \times 10^{-09}}{5.4 \times 10^{-10}}$   | $\frac{4.3 \times 10^{-10}}{1.7 \times 10^{-10}}$ | $\frac{7.7 \times 10^{-11}}{2.6 \times 10^{-11}}$ |
| Каолинит, иллит                                    | Глина легкая                               | $\frac{1.4 \times 10^{-09}}{4.7 \times 10^{-10}}$   | $\frac{3.1 \times 10^{-10}}{1.0 \times 10^{-10}}$ | $\frac{4.3 \times 10^{-11}}{1.5 \times 10^{-11}}$ |
|  | Суглинок тяжелый                           |   |   |   |
|  | Суглинок легкий                            |   |   |   |
|  | Супесь                                     |   |   |   |

дит его физическое разрушение как сплошного тела.

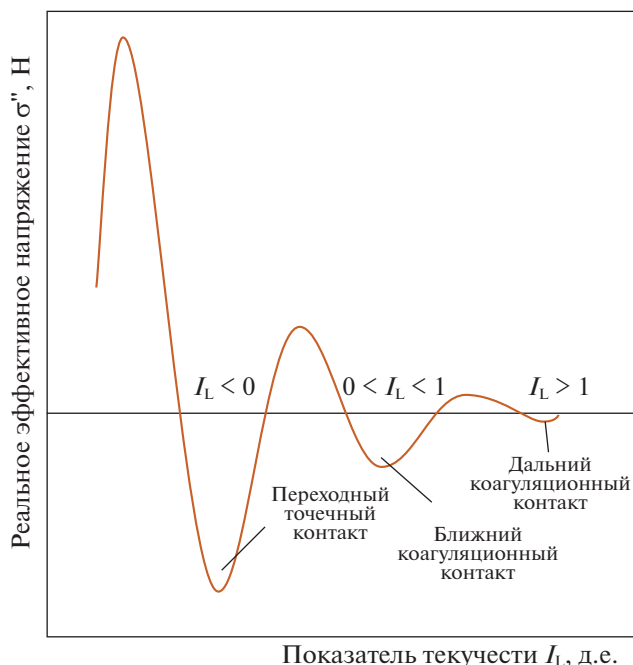
Специфическая особенность структурных контактов дисперсных глинистых грунтов – их обратимость, т.е. способность к трансформации из одного типа в другой при определенных условиях. Возможность таких трансформаций подтверждается данными, показанными на рис. 3.

Эти данные свидетельствуют о том, что, в зависимости от содержания влаги, определяющего толщину гидратных пленок частиц и, соответственно, расстояние между частицами, в одних и тех же по составу грунтах могут формироваться контакты различного типа. В структуре глини-

стых грунтов практически всегда присутствуют контакты различного типа, поэтому, характеризуя такие грунты, необходимо говорить именно о преобладающем типе контактов, который и определяет их строение и свойства. В то же время наличие в структурном строении глин контактов разного типа позволяет объяснить несоответствие реального характера их деформирования закону перехода упругих деформаций в пластические. Как видно из данных, приведенных в табл. 1 и показанных на рис. 2, различия между величиной реальной эффективной прочности и дефор-



**Рис. 2.** Уровни напряжений в глинистых грунтах: 1 – реальная эффективная деформируемость; 2 – реальная эффективная прочность; 3 – прочность по закону Мора–Кулона.



**Рис. 3.** Зависимость реальных эффективных напряжений в глинистых грунтах от содержания влаги.

мируемости для контактов различного типа в одних и тех же разновидностях грунтов существенны, отличаются в 10–100 раз. Эти факторы оказывают влияние на характер деформирования глин, так как одна и та же нагрузка, передаваемая на структурные контакты различного типа, может приводить к разрушению дальних коагуляционных контактов, развитию пластических деформаций на ближних коагуляционных контактах и упругих деформаций на контактах переходного типа. В определенных условиях преобладающий тип контактов для конкретного глинистого грунта может изменяться, и именно определение условий и закономерностей таких трансформаций важно для оценки свойств глин и возможностей их изменения.

Как уже было отмечено выше, реальная деформируемость глинистых грунтов при действии нагрузок не всегда может быть описана положениями теорий упругости и пластичности. Во многих случаях деформации в грунтах продолжаются даже после стабилизации (называемой условной стабилизацией), и наиболее ярко такие эффекты проявляются при длительном времени действия нагрузок. Подтверждения таких явлений наблюдаются в реальных условиях строительства и эксплуатации инженерных сооружений, когда при неизменных условиях нагружения в течение длительного времени продолжают изменяться строение и свойства глинистых грунтов оснований, вызывающие дополнительные деформации в них. В практике инженерно-геологических исследований зафиксировано множество фактических свидетельств и примеров такого рода.

Описанные положения дают общую характеристику реакции глинистых грунтов на действие внешних нагрузок, но не в полной мере позволяют охарактеризовать возможности изменения их строения и свойств при действии “промежуточных” нагрузок, величина которых находится между описанными выше уровнями напряжений.

В условиях нагружения, при которых реальные эффективные напряжения не превышают уровень реальной эффективной деформируемости, преобладающие силы притяжения между частицами препятствуют деформированию грунта и направлены на возвращение дисперсной системы в исходное равновесное энергетическое состояние. Деформация грунта в этом случае может происходить лишь при постоянном нарастании внешней нагрузки, при снятии которой грунт стремится к возвращению в первоначальное состояние, т.е. в нем протекает упругая деформация [6].

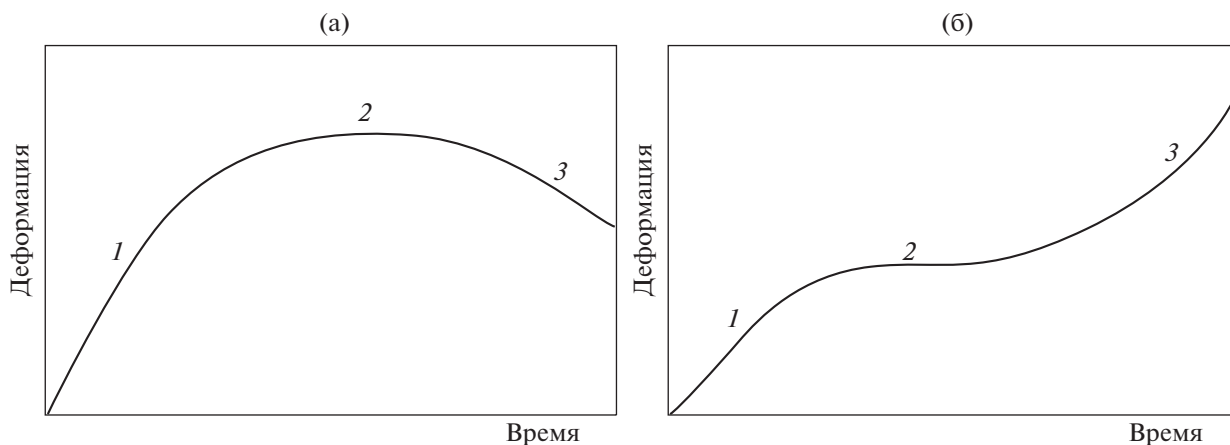
При стабилизации действия внешней нагрузки на этом уровне силы притяжения так же стремятся вернуть грунт в исходное состояние. В этом случае, в зависимости от соотношения реальной эффективной прочности грунта и величины ре-

альных эффективных напряжений (величины внешней нагрузки), возможна либо стабилизация деформаций грунта, либо развитие обратной деформации. Характерный пример такого деформирования грунта показан на рис. 4а. На приведенном графике выделяются три этапа деформирования: 1 – деформирование при увеличении внешней нагрузки, 2 – стабилизация деформации при неизменной внешней нагрузке, 3 – развитие обратной деформации. В зависимости от величины внешней нагрузки, третий этап деформирования может отсутствовать. Как видно, каждый из этапов деформирования в условиях нагружения, при которых реальные эффективные напряжения не превышают уровень реальной эффективной деформируемости, соответствует определенному виду деформаций в теории ползучести. Первый этап соответствует условно-мгновенной деформации, второй – установившейся (линия 2 на рис. 1), третий – затухающей (линия 1 на рис. 1).

При увеличении нагрузки выше реальной эффективной деформируемости в глинистой дисперсной системе преобладают силы отталкивания между частицами, действующие однонаправленно с внешними нагрузками. В этих условиях деформирование происходит как за счет влияния внешней нагрузки, так и внутренних сил взаимодействия между частицами, и при снятии или стабилизации внешней нагрузки деформирование грунта может продолжаться за счет действия последних. Характерный пример такого деформирования грунта показан на рис. 4б. На приведенном графике выделяются три этапа деформирования: 1 – деформирование при увеличении внешней нагрузки, 2 – стабилизация деформации при неизменной внешней нагрузке, 3 – дальнейшее развитие деформации. В зависимости от величины внешней нагрузки, второй этап деформирования может отсутствовать. Как видно, каждый из этапов деформирования в условиях нагружения, при которых реальные эффективные напряжения превышают уровень реальной эффективной деформируемости и ниже реальной эффективной прочности, соответствует определенному виду деформаций в теории ползучести (см. рис. 1). Первый этап соответствует условно-мгновенной деформации, второй – установившейся (линия 2 на рис. 1), третий – прогрессирующей (линия 3 на рис. 1).

При дальнейшем увеличении нагрузки и достижении реальным эффективным напряжением уровня реальной эффективной прочности происходит разрушение контактов в грунте. При этом его физического разрушения не происходит, но преобразуется его структурное строение. При условии, когда нагрузка на грунт не превышает предела его физической прочности по Мору–Кулону, продолжающееся действие нагрузки приво-





**Рис. 4.** Характерная деформируемость грунта при стабилизации внешней нагрузки на уровне: (а) – ниже реальной эффективной деформируемости; (б) – на уровне выше реальной эффективной деформируемости и ниже реальной эффективной прочности (пояснения в тексте).

дит к формированию новых структурных связей, и характер этих изменений зависит от условий приложения нагрузок.

Под действием сжимающих нагрузок происходит сближение частиц грунта за счет сжатия и постепенного частичного разрушения с переходом в свободную воду их гидратных пленок. В конечном итоге эти процессы способствуют образованию новых, более прочных контактов и переходу самого грунта в более твердое физико-химическое состояние.

Такой механизм трансформации контактов был подтвержден серией специальных экспериментов. Для этого к глинистым грунтам прикладывалось сжимающее давление, превышающее их реальную эффективную прочность, и велся контроль развития деформаций. Испытания проводились в одометрах, приборах недренированного сдвига и трехосного сжатия. После окончания опыта для грунтов определялись физические и механические свойства (методом чистого сдвига для определения прочностных свойств и трех-

осного сжатия по консолидировано-дренированной методике для определения деформационных свойств).

На первом этапе испытывались текучие грунты, на втором – пластичные грунты, сформировавшие на первом этапе испытаний. Результаты проведенных исследований можно продемонстрировать на примере легких глин каолинит-иллитового состава, которые приведены в табл. 2.

Величина реальной эффективной прочности и деформируемости грунтов после испытаний соответствует этим показателям, установленным для естественных грунтов соответствующего физико-химического состояния, приведенным в табл. 1.

После проведения вышеописанных испытаний были проведены исследования образцов глин методом компьютерной рентгеновской томографии (X-ray mCT) в Почвенном институте им. В.В. Докучаева РАН на рентгеновском микротомографе SkyScan 1172G. Этот метод анализа внутренней структуры объектов позволяет полу-

**Таблица 2.** Изменение свойств глин при действии сжимающей нагрузки

| Исходный естественный грунт |                              |                            |   |           | Грунт после воздействия нагрузки |                              |                            |   |           |
|-----------------------------|------------------------------|----------------------------|---|-----------|----------------------------------|------------------------------|----------------------------|---|-----------|
| Влажность, %                | Плотность, г/см <sup>3</sup> | Показатель текучести, д.е. | Реальные эффективные напряжения в единичном объеме, Н |           | Влажность, %                     | Плотность, г/см <sup>3</sup> | Показатель текучести, д.е. | Реальные эффективные напряжения в единичном объеме, Н |           |
|                             |                              |                            | Деформируемость                                       | Прочность |                                  |                              |                            | Деформируемость                                       | Прочность |
| 80.5                        | 1.51                         | 1.01                       | 0.007   | 0.06      | 65.0                             | 1.61                         | 0.56                       | 0.12  | 0.34      |
| 65.0                        | 1.61                         | 0.56                       | 0.12  | 0.34      | 45.0                             | 1.76                         | -0.03                      | 0.35  | 1.24      |

**Таблица 3.** Изменение морфометрических параметров структуры глин в результате действия сжимающих нагрузок

| Морфометрический показатель  | Глина твердая      |                 | Глина пластичная   |                 | Глина текучая      |
|--|--------------------|-----------------|--------------------|-----------------|--------------------|
|  | естественный грунт | после испытания | естественный грунт | после испытания | естественный грунт |
| Объем исследуемой ячейки, мм <sup>3</sup>                            | 3.46               |                 |                    |                 |                    |
| Общая пористость, %  | 38.9               | 37.2            | 44.3               | 48.6            | 51.3               |
| Средний размер пор, мм   | 0.0066             | 0.0060          | 0.0073             | 0.0078          | 0.0107             |
| Объем пор в исследуемой ячейке, мм <sup>3</sup>                      | 0.82               | 0.62            | 1.53               | 1.67            | 1.78               |
| Количество контактов между связанными частицами в исследуемой ячейке | 962949             | 995264          | 894405             | 915787          | 287867             |

**Таблица 4.** Изменение свойств суглинков при действии ослабляющей нагрузки

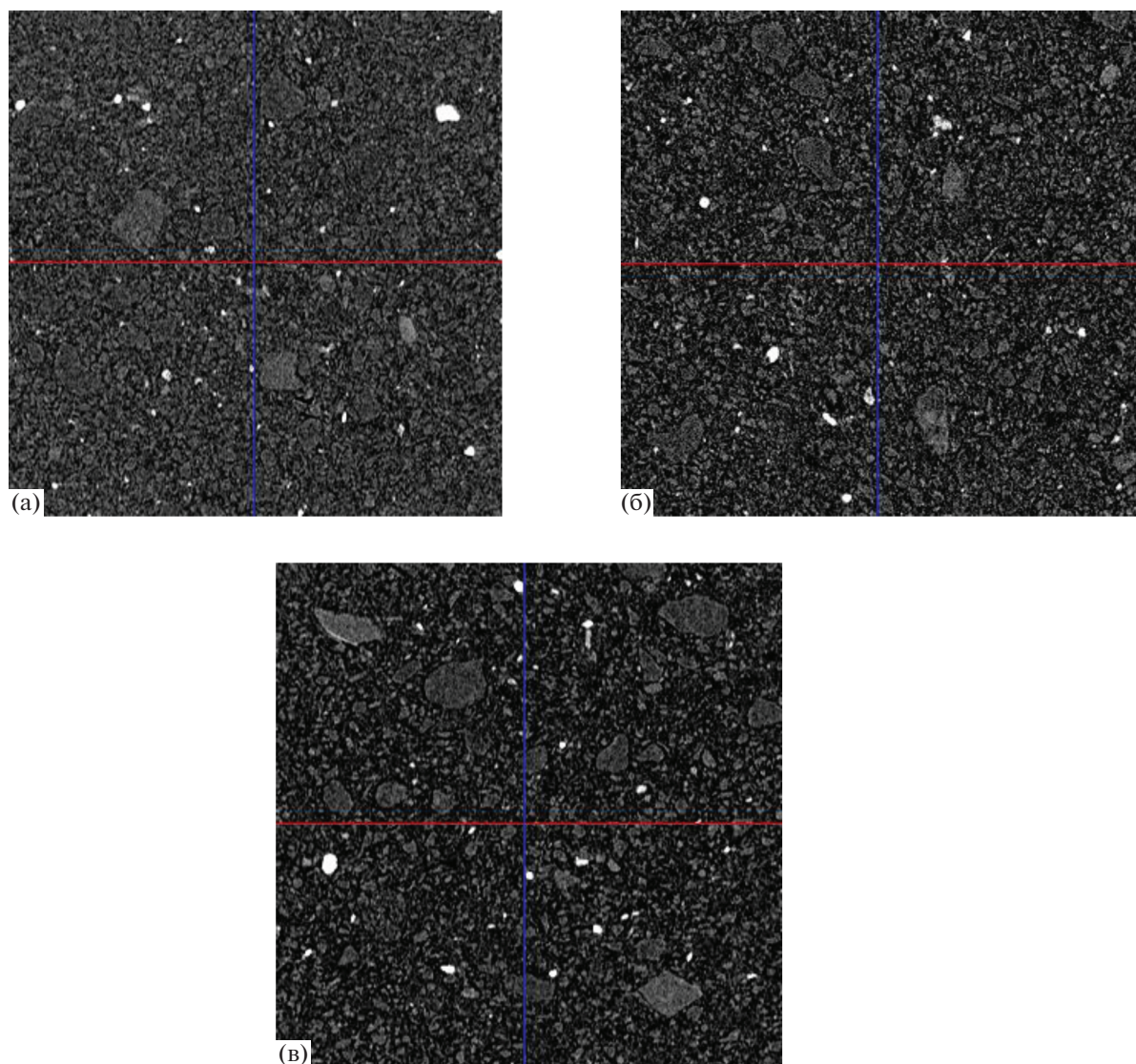
| Исходный естественный грунт |                              |                            |   |           | Грунт после воздействия нагрузки |                              |                            |   |           |
|-----------------------------|------------------------------|----------------------------|---|-----------|----------------------------------|------------------------------|----------------------------|---|-----------|
| Влажность, %                | Плотность, г/см <sup>3</sup> | Показатель текучести, д.е. | Реальные эффективные напряжения в единичном объеме, Н |           | Влажность, %                     | Плотность, г/см <sup>3</sup> | Показатель текучести, д.е. | Реальные эффективные напряжения в единичном объеме, Н |           |
|                             |                              |                            | Деформируемость                                       | Прочность |                                  |                              |                            | Деформируемость                                       | Прочность |
| 12.0                        | 2.27                         | -0.08                      | 0.24  | 0.90      | 18.2                             | 2.13                         | 0.56                       | 0.05  | 0.19      |
| 18.0                        | 2.13                         | 0.54                       | 0.05  | 0.19      | 23.0                             | 2.04                         | 1.05                       | 0.003   | 0.05      |

чать их томографические проекции и рассчитывать морфометрические параметры их внутренней структуры [7]. Результаты томографических исследований, приведенные в табл. 3 и на рис. 5 и 6, показывают, что в результате действия сжимающих нагрузок исходная структура глин разрушается и формируется новая структура, характерная для грунтов с более прочными структурными связями.

Длительное действие докритических (по Морю–Кулону) нагрузок приводит к изменению структурных связей в глинах, за счет разрушения существующих и образования новых, более устойчивых. Физически это выражается в уплотнении грунтов, снижении влажности и показателя текучести, увеличении показателей прочностных и деформационных свойств. Такие изменения соответствуют результатам протекания процессов вторичной консолидации, при этом проведенные исследования позволяют понять и описать природу и причины этих явлений и закономерности их протекания.

Свойство обратимости структурных контактов глинистых грунтов (см. рис. 3) позволяет предполагать, что в определенных условиях приложения нагрузок их трансформация может протекать в обратном направлении, т.е. после разрушения под действием нагрузки могут формироваться менее устойчивые контакты. Для проверки этого теоретического положения была проведена серия специальных экспериментальных исследований. Принципиально схема проведения испытаний аналогична вышеописанной, но образцы грунта брались в исходном твердом физико-химическом состоянии, а нагружение грунта проводилось путем создания противодействия в поровой воде. Величина противодействия устанавливалась так, чтобы она превышала реальную эффективную прочность грунта, при этом грунт нагружался дополнительной нагрузкой, превышающей величину противодействия для того, чтобы предотвратить набухание или размокание грунта.

Результаты исследований можно продемонстрировать на примере испытаний образцов суглинков, эти данные приведены в табл. 4. Вели-



**Рис. 5.** Томографическая проекция структуры глин (исходный естественный грунт): (а) – твердых; (б) – пластичных, (в) – текучих.

чина реальной эффективной прочности и деформируемости грунтов после испытаний соответствует этим показателям, полученным для естественных грунтов соответствующего физико-химического состояния, приведенным в табл. 1.

В результате длительного действия противодавления, также как и в случае сжимающих нагрузок, происходит трансформация контактов, но в данном случае формируются новые, менее устойчивые контакты. Действие противодавления в поровой воде способствует увеличению расстояния между частицами грунта и увеличению толщины гидратных пленок за счет перехода части свободной воды в диффузный слой, что и приводит к изменению структурных связей в глинистых грунтах. Физически это выражается в разуплотнении грунтов, снижении их плотности,

повышении влажности и показателя текучести, ослаблении прочностных и деформационных свойств.

## ВЫВОДЫ

Характер деформирования глинистых грунтов определяется не только величиной воздействующих на них внешних нагрузок, но и в значительной степени реакцией самих грунтов на действие этих нагрузок. Эта реакция вызывается изменением структурного строения глин в результате нарушения энергетического взаимодействия между слагающими их минеральными частицами.

Закономерность деформирования глинистого грунта зависит от соотношения уровня и характера внешних нагрузок и вызванных ими общих и



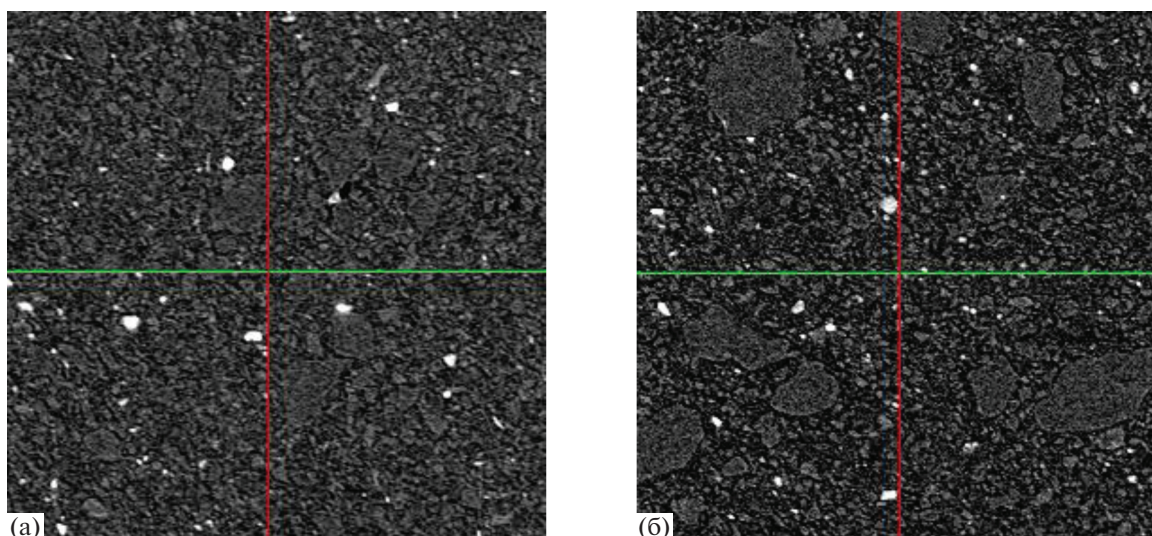


Рис. 6. Томографическая проекция структуры глин, сформированных под действием сжимающих нагрузок: (а) – твердых; (б) – пластичных.

реальных напряжений на структурных контактах и величины внутренних взаимодействий в нем – реальной эффективной прочности и деформируемости. Сопоставительный анализ этих характеристик дает возможность прогноза деформаций, которые будут протекать в глинистых грунтах в реальных условиях нагружения. Такой анализ позволяет, с одной стороны, охарактеризовать строение и свойства глинистых грунтов, с другой – дает понимание причин и закономерностей характера их деформирования, в ряде случаев противоречащий общепринятым теоретическим положениям механики грунтов. Наиболее важными среди таких противоречий являются изменение свойств глин при действии нагрузок, неоднозначный характер их деформирования, развитие либо незатухающих деформаций после их стабилизации или их затухание, либо упругих деформаций на стадии пластического деформирования и другие особенности, проявляющиеся в различных условиях действия нагрузок.

С другой стороны, предложенный подход позволит дать достоверный прогноз изменения строения и свойств глинистых грунтов в реальных условиях действия нагрузок. В этом случае использование показателей реальной эффективной прочности и деформируемости в прогнозных расчетах устойчивости и деформирования глинистых грунтов приведет к повышению их точности при осуществлении практической инженерно-хозяйственной деятельности.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богданов Е.Н. О механических свойствах глинистых грунтов // Грунтоведение. 2012. № 1. С. 64–71.
2. Богданов Е.Н. Состояние проблемы с определением физико-механических свойств грунтов // Грунтоведение. 2015. № 1. С. 54–67.
3. Болдырев Г.Г., Малышев М.В. Механика грунтов. Основания и фундаменты. Пенза: ПГУАЗ, 2009. 412 с.
4. Вознесенский Е.А. Пороговые деформации в грунтах // Геотехника. 2018. Т. X. № 5–6. С. 6–16.
5. Карпенко Ф.С. Физико-химическая природа прочности глинистых грунтов // Геоэкология. 2019. № 5. С. 48–60.
6. Карпенко Ф.С. Физико-химическая природа деформируемости глинистых грунтов // Геоэкология. 2020. № 6. С. 63–73.
7. Карпенко Ф.С., Абросимов К.Н., Сереброва О.В. Вопросы определения числа структурных контактов в глинистых дисперсных грунтах // Геоэкология. 2021. № 5. С. 60–71.
8. Ломтадзе В.Д. Изменение состава, структуры, плотности и связности глин при уплотнении их большими нагрузками // Тр. лаборатории гидрогеологических проблем АН СССР. 1955. Т. 12.
9. Осипов В.И., Соколов В.Н., Румянцева Н.А. Микроструктура глинистых пород / Под ред. Е.М. Сергеева. М.: Недра, 1989. 211 с.
10. Осипов В.И. Физико-химическая теория эффективных напряжений в грунтах. М.: ИГЭ РАН, 2012. 74 с.
11. Осипов В.И., Соколов В.Н. Глины и их свойства. Состав, строение и формирование свойств. М.: ГЕОС, 2013. 576 с.
12. Сергеев Е.М. К вопросу о механической прочности дисперсных грунтов // Уч. зап. МГУ. 1949. № 10.
13. Соколов В.Н. Влияние влажности на прочность структурных связей глинистых частиц // Вестник МГУ. Сер. геологическая. 1973. № 6. С. 100–104.
14. Соколов В.Н., Осипов В.И. Влияние различных категорий связанной воды на прочность глин // Свя-

- занная вода в дисперсных системах. 1977. Вып. 4. М.: МГУ. С. 4–15.
15. Соколов В.Н. Физико-химические аспекты механического поведения глинистых грунтов // Инженерная геология. 1985. № 4. С. 18–41.
  16. Соколов В.Н. Модели микроструктур глинистых грунтов // Инженерная геология. 1991. № 6. С. 32–40.
  17. Усов А.Н., Чернов М.С., Соколов В.Н., Вознесенский Е.А. Изменение микростроения глинистых грунтов при деформировании в условиях трехосного сжатия с учетом проявления деформационной неустойчивости // Вестник МГУ. Сер. 4. Геология. 2017. № 6. С. 87–91.
  18. Филатов М.М. О микроструктуре грунтов в связи с деформациями их под влиянием нагрузки // Физика почв СССР. Тр. Сов. секции Междунар. ассоциации почвоведов. Т. 5. 1936.

## THE MODE OF CLAY SOIL DEFORMATIONS FROM THE STANDPOINT OF PHYSICO-CHEMICAL THEORY OF EFFECTIVE STRESSES

F. S. Karpenko<sup>a, #</sup>

<sup>a</sup> *Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences, Ulanskii per. 13, str. 2, Moscow, 101000 Russia*

<sup>#</sup> *E-mail: kafs08@bk.ru*

The character of deformations in clay soils under various stress conditions is considered from the standpoint of their physicochemical structure. It is shown that the deformation specificity of clays is determined not only by the external loads values but, above all, by the magnitude of internal interaction between clay-mineral particles composing them. The characteristic of clay deformation can be given on the basis of a comparative analysis of external stresses transmitted to their structural contacts with the value of real effective strength and deformability. This analysis allows us to explain the specific features of clay soil deformations that contradict the generally accepted theoretical provisions of soil mechanics and makes it possible to reasonably predict their deformation behavior under real stress conditions during the construction and operation of engineering and economic facilities and structures.

**Keywords:** *structural contacts, type of contact, real effective strength, real effective deformability*

### REFERENCES

1. Bogdanov, E.N. *O mekhanicheskikh svoystvakh glinistykh gruntov* [About mechanical properties of clay soils]. *Gruntovedenie*, 2012, no. 1, pp. 64–71. (in Russian)
2. Bogdanov, E.N. *Sostoyanie problemy s opredeleniem fiziko-mekhanicheskikh svoystv gruntov* [The state-of-art in determining physicochemical properties of soils]. *Gruntovedenie*, 2015, no. 1, pp. 54–67. (in Russian)
3. Boldyrev, G.G., Malyshev, M.V. *Mekhanika gruntov. Osnovaniya i fundamente* [Soil mechanics. Foundations and basements]. Penza, PGU AZ Publ., 2009, 412 p. (in Russian)
4. Voznesenskii, E.A. *Porogovye deformatsii v gruntakh* [Threshold deformations in soils]. *Geotekhnika*, 2018, vol. X, no. 5–6, pp. 6–16. (in Russian)
5. Karpenko, F.S. *Fiziko-khimicheskaya priroda prochnosti glinistykh gruntov* [Physicochemical nature of clayey soil strength]. *Geoekologiya*, 2019, no. 5, pp. 48–60. (in Russian)
6. Karpenko, F.S. *Fiziko-khimicheskaya priroda deformiruemosti glinistykh gruntov* [Physicochemical nature of clayey soil deformability]. *Geoekologiya*, 2020, no. 6, pp. 63–73. (in Russian)
7. Karpenko, F.S., Abrosimov, K.N., Serebrova, O.V. *Voprosy opredeleniya chisla strukturnykh kontaktov v glinistykh dispersnykh gruntakh* [Issues of determining the number of structural contacts in clayey dispersed soils]. *Geoekologiya*, 2021, no. 5, pp. 60–71 (in Russian).
8. Lomtadze, V.D. *Izmenenie sostava, struktury, plotnosti i svyaznosti glin pri uplotnenii ikh bol'shimi nagruzkami* [Changes in the composition, structure, density and cohesion of clays when compacted with heavy loads]. *Trudy laboratorii gidrogeologicheskikh problem AN SSSR*, 1955, vol. 12. (in Russian)
9. Osipov, V.I., Sokolov, V.N., Rummyantseva, N.A. *Mikrostruktura glinistykh porod* [Microstructure of clay rocks]. Sergeev, E.M., Ed. Moscow, Nedra Publ., 1989, 210 p. (in Russian)
10. Osipov, V.I. *Fiziko-khimicheskaya teoriya effektivnykh napryazhenii v gruntakh* [Physicochemical theory of effective stresses in soils]. Moscow, IEG RAS, 2012, 74 p. (in Russian)
11. Osipov, V.I., Sokolov, V.N. *Gliny i ikh svoystva. Sostav, stroenie i formirovanie svoystv* [Clays and their properties. Composition, structure and formation of properties]. Moscow, GEOS Publ., 2013, 576 p. (in Russian)
12. Sergeev, E.M. *K voprosu o mekhanicheskoi prochnosti dispersnykh gruntov* [About the mechanical strength of fine-grained soils]. *Uch. zapiski MGU*, 1949, no. 10. (in Russian)
13. Sokolov, V.N. *Vliyanie vlazhnosti na prochnost' strukturnykh svyazei glinistykh chastits* [Moisture effect on the strength of structural connections of clay particles].

- Vestnik Moskovskogo Universiteta. Ser. 4. Geolog.*, 1973, no. 6, pp. 100–104. (in Russian).
14. Sokolov, V.N., Osipov, V.I. *Vliyaniye razlichnykh kategorii svyazannoi vody na prochnost' glin* [Influence of different categories of bound water on the strength of clays]. *Svyazannaya voda v dispersnykh sistemakh*, Moscow, Moscow St. Univ. Publ., 1977, Vyp. 4, pp. 4–15. (in Russian)
  15. Sokolov, V.N. *Fiziko-khimicheskie aspekty mekhanicheskogo povedeniya glinistykh gruntov* [Physicochemical aspects of the mechanical behavior of clay soils]. *Inzhenernaya geologiya*, 1985, no. 4, pp. 28–41. (in Russian)
  16. Sokolov, V.N. *Modeli struktur glinistykh gruntov* [Clay soil microstructure models]. *Inzhenernaya geologiya*, 1991, no. 6, pp. 32–40. (in Russian)
  17. Usov, A.N., Chernov, M.S., Sokolov, V.N., Voznesenskii, E.A. *Izmeneniye mikrostroeniya glinistykh gruntov pri deformirovaniy v usloviyakh trekhosnogo szhatiya s uchetom proyavleniya deformatsionnoi neustoichivosti* [Changes in the microstructure of clay soils during deformation under conditions of triaxial compression, taking into account the manifestation of deformation instability]. *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Ser. 4. Geolog.*, 2017, no. 6, pp. 87–91. (in Russian)
  18. Filatov, M.M. *O mikrostrukture gruntov v svyazi s deformatsiyami ikh pod vliyaniem nagruzki* [On the microstructure of soils in connection with their deformations under load]. *Fizika pochv SSSR. Trudy Sov. sektsii Mezhdunarodnoi assotsiatsii pochvedov.* 1936, vol. 5. (in Russian)



---

---

**МЕТОДОЛОГИЯ И МЕТОДИКА  
ИССЛЕДОВАНИЙ**

---

---

УДК 504:502.64

**ИНДЕКС ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ГОРОДОВ РОССИИ:  
КРИТЕРИИ, ПОКАЗАТЕЛИ, ОЦЕНКА**© 2022 г. Е. В. Булдакова<sup>1,\*</sup>, В. Г. Заиканов<sup>1</sup>, Т. Б. Минакова<sup>1</sup>, Ю. П. Прокопенко<sup>1</sup><sup>1</sup> *Институт геоэкологии им Е.М. Сергеева РАН,  
Уланский пер., 13, стр. 2, Москва, 101000 Россия**\*E-mail: e\_buldakova@mail.ru*

Поступила в редакцию 06.08.2022 г.

После доработки 30.08.2022 г.

Принята к публикации 12.09.2022 г.

В статье рассматривается методический подход к определению *Индекса геоэкологической безопасности* (ИГБ), реализованный на представительной выборке российских городов. Анализ существующих подходов и методик определения интегральных экологических индексов как в России, так и за рубежом показал отсутствие в них геоэкологических факторов, выраженных конкретными показателями или индикаторами. На основе оценки геоэкологической опасности 100 модельных городов России были обоснованы показатели и рассчитаны индикаторы, отражающие их геоэкологическое состояние, определены количественные значения ИГБ. Сравнение существующих экологических показателей для одних и тех же городов, входящих в информационно-аналитические системы России, показало несопоставимость балльных оценок и значительные различия в перечне учитываемых экологических параметров, в частности практическое отсутствие геоэкологических индикаторов. В целях повышения эффективности решения задач в области устойчивого развития урбанизированных территорий целесообразна интеграция данных ИГБ в существующие информационно-аналитические системы по оценке экологического состояния городов России.

**Ключевые слова:** *геоэкологическая опасность/безопасность, индекс геоэкологической безопасности, индикатор геоэкологической безопасности, города России*

**DOI:** 10.31857/S0869780922060029**ВВЕДЕНИЕ**

Один из глобальных трендов развития городов в XXI в. — стремительная урбанизация в условиях меняющейся окружающей среды. Как отмечают эксперты ООН, урбанизация является мощным инструментом устойчивого развития, только в том случае, если ее процессы хорошо спланированы<sup>1</sup>. В настоящее время в городах России, так же, как и в мире, наметилась устойчивая тенденция роста населения. Почти 75% населения нашей страны проживает в городах, из них  $\frac{3}{4}$  сосредоточены в городах с населением более 100 тыс. человек. Для большинства городов характерны высокий уровень загрязнения воздуха и почв, снижение устойчивости геологической среды, изменение режима подземных вод, негативное воздействие физических полей и т.п. Поэтому одной из актуальных задач становится обеспечение комфортной и безопасной городской среды как основы дальнейшего устойчивого развития городов [8, 9, 11].

В России экологическая безопасность входит в число приоритетных направлений обеспечения национальной безопасности, что подтверждается реализацией различных программ и документов<sup>2</sup>. В настоящее время при анализе экологической безопасности городских территорий практически рассматриваются только: загрязнение природных компонентов, обеспеченность водными ресурсами и сохранение биоразнообразия [1, 2, 5, 7–10]. Характеристики же устойчивости геологической среды и других геоэкологических факторов при планировании городской территории, проектировании и строительстве учитываются недостаточно. Отмечается неудовлетворительное состояние геологической среды во многих городах. Увеличение частоты проявления опасных геоэкологических процессов требует дальнейшего развития системы показателей и индикаторов для их

<sup>2</sup> Указ Президента Российской Федерации о Стратегии экологической безопасности Российской Федерации на период до 2025 года. <http://static.kremlin.ru/media/acts/files/0001201704200016.pdf>

<sup>1</sup> <https://news.un.org/ru/story/2022/04/1422882>

объективной оценки и учета при мониторинге современной экологической ситуации в городах.

В настоящее время часто используемыми инструментами определения качества городской среды, в том числе и экологического благополучия городов, являются разнообразные индексы, представляющие собой комплексные количественные показатели. В мировой практике используются различные индексы для оценки городов с социально-экономической, эколого-экономической, социально-экологической позиций (*Инициатива благополучия городов*)<sup>3</sup> (City Prosperity Initiative), *Индекс глобальных городов*<sup>4</sup> (Global Cities Index), *Индекс экологической эффективности*<sup>5</sup> (Environmental Performance Index) и др. В России регулярно рассчитываются индексы и определяются рейтинги городов [1, 2, 9–11 и др.], частично отражающие экологические характеристики. Индексы позволяют сравнивать города между собой на глобальном, национальном и региональном уровнях и разрабатывать рекомендации по улучшению и управлению городским пространством.

Все эти индексы так или иначе затрагивают аспект оценки окружающей среды. В международных<sup>6</sup> и национальных документах<sup>7</sup> подчеркивается необходимость безопасного развития городской среды для улучшения качества жизни и комфортности проживания городского населения. Достижение этой цели возможно при уменьшении негативного экологического, в том числе геоэкологического воздействия на городскую среду.

Таким образом, цель существующих индексов – оценивать состояние городов в целом и сравнивать их между собой. Индексы служат информационной основой для принятия управленческих решений, в том числе по долгосрочному городскому планированию. Анализ структуры индикаторов позволяет понять, какие факторы окружающей среды наиболее остро нуждаются в изменении. Однако слишком часто отмечается, что существующие данные о состоянии городской среды недостаточно детализированы, документированы и согласованы, или они просто недоступны [1, 2, 5, 10].

Цель настоящего исследования – разработать методический подход к определению количественных значений *Индекса геоэкологической без-*

*опасности* (ИГБ) и реализовать его на модельной выборке городов России.

Основная задача исследований направлена на обоснование необходимости учета геоэкологических особенностей города при комплексной оценке его территории, которая представлялась бы индивидуальным индексом.

## МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ИНДЕКСА ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Авторами предлагается рассматривать геоэкологическую безопасность городов как обратную величину геоэкологической опасности [6, 4]. Геоэкологические опасности подразделяются на два блока: природный и техногенный. Однако из-за тесного взаимодействия их составляющих в городах чаще всего выделяются природно-техногенные или геоэкологические процессы (опасности) [3]. В отличие от локальных природных процессов, приуроченных чаще всего к периферийным участкам незастроенной городской территории, многочисленные объекты техногенного воздействия на геологическую среду рассредоточены по всей городской территории. При этом основными исходными показателями для оценки геоэкологической безопасности являются площади поражения природными процессами, аварийными разливами и т.п.

Согласно принятому критерию оценки геоэкологической безопасности минимальный вероятный ущерб от последствий проявления негативных природно-техногенных процессов, степень геоэкологической опасности города определяется величиной потенциального ущерба. Привлечение стоимостных величин обеспечивает сопоставимость оценок как по отдельным индикаторам внутри одной группы, так и между группами. Переход к оценке ущербов на начальном уровне позволяет избежать несопоставимости измерения учитываемых геоэкологических факторов в различных физических единицах. Приведение получаемых величин оценки опасности к единице площади обеспечивает сопоставимость результатов оценки между городами. Последовательность определения ИГБ показана на рис. 1.

На первом этапе изучается территория города с целью выявления существующих и потенциально возможных опасных геоэкологических процессов. Проводится систематизация информации по группам, определяемым по признакам генезиса и ожидаемых видов последствий, уточняется набор собираемых показателей, источники их получения. Организуется сбор необходимой информации. Оценивается ее достаточность для осуществления необходимых расчетов по группам для определения видов и значений частных инди-

<sup>3</sup> <https://unhabitat.org/programme/city-prosperity-initiative>

<sup>4</sup> <https://www.kearney.com/global-cities/2021>

<sup>5</sup> <https://epi.yale.eduhttps://www.un.org/sustainabledevelopment/ru/sustainable-development-goals/>

<sup>6</sup> <https://www.un.org/sustainabledevelopment/ru/sustainable-development-goals/>

<sup>7</sup> <http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&firstDoc=1&lastDoc=1&nd=102430636>

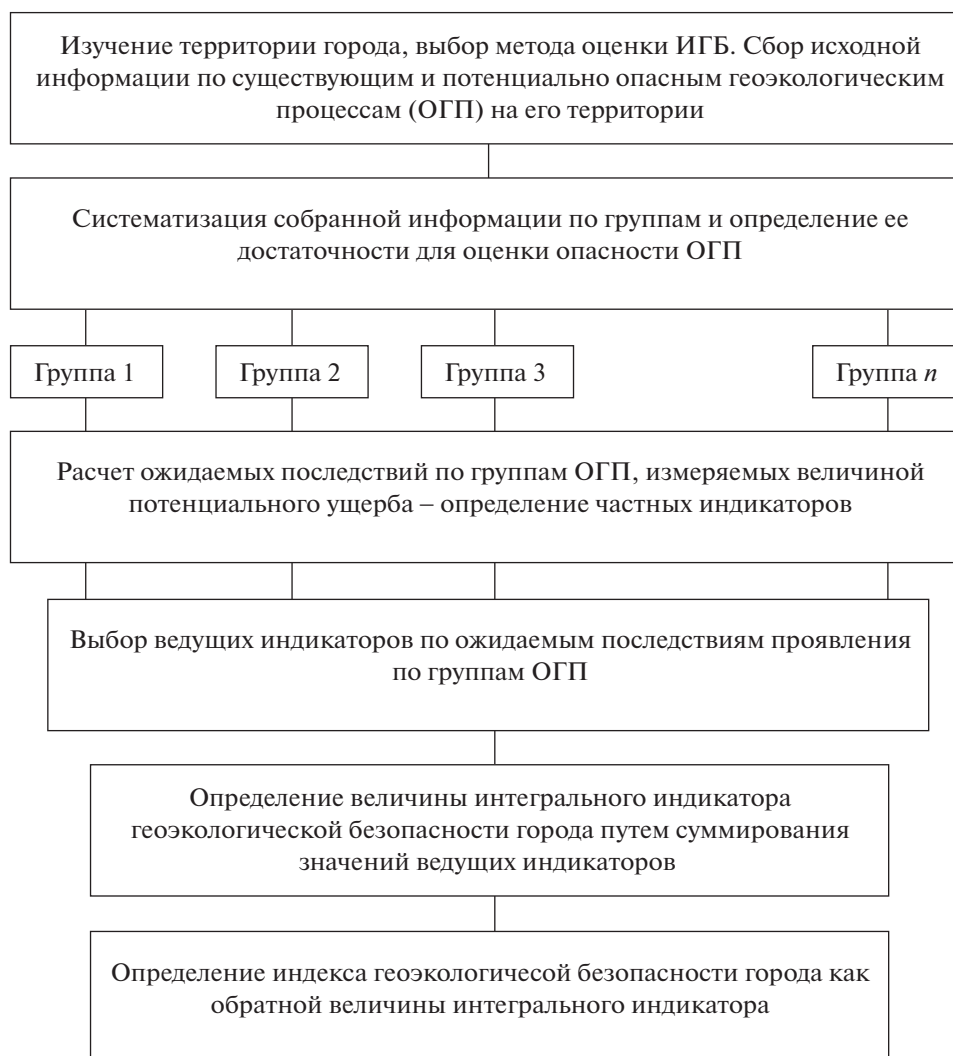


Рис. 1. Алгоритм определения Индекса геоэкологической безопасности города.

каторов. Под индикатором понимается *показатель, отражающий ожидаемые негативные изменения состояния городской среды при проявлении геоэкологических процессов, измеряемые величиной потенциального ущерба*. По своей сути индикатор – обоснованный количественный показатель – мера для сопоставления фактического состояния городской территории с планируемым уровнем безопасности (допустимый уровень ущерба/затраты на соответствующие природоохранные мероприятия).

Значения частных индикаторов рассчитываются на основе первичных данных о современном состоянии или возможном изменении геоэкологических условий на территории города. В итоге частные индикаторы позволяют судить об опасности отдельных геоэкологических процессов. Из их числа выбираются ведущие индикаторы, набор которых должен обеспечить достаточ-

ность определения индекса. Правильный выбор ведущих геоэкологических индикаторов обеспечивает повышение эффективности принимаемых решений в сфере развития и планирования городской среды.

Сумма значений ведущих индикаторов – *интегральный индикатор*, является основой для определения ИГБ. Отнесенное к площади города интегральное значение геоэкологического индикатора позволяет сопоставлять города между собой по уровню геоэкологической опасности, а частные индикаторы – определять их геоэкологические проблемы.

Анализ различных методик расчетов индексов [2, 7, 8, 10, 11] показал, что, как правило, они измеряются в баллах. Индекс может быть представлен суммой баллов в несколько сотен, или 100-балльной шкалой, например, как в экологи-

ческом рейтинге регионов России<sup>8</sup>, но чаще всего 10-балльной шкалой. Обычно они рассчитываются по некоторому количеству различных индикаторов, измеряемых в собственных физических единицах, что затрудняет сопоставление городов между собой. При этом каждый индикатор оценивается по 10-балльной шкале. Такая оценка может определяться разницей между максимумом и минимумом абсолютных значений в массиве данных, разделенном на 10 равных отрезков шкалы для каждого балла, и таким образом определяется фиксированное абсолютное значение<sup>9</sup>.

Особенность ИГБ заключается в многообразии и сложности взаимосвязей природных и техногенных процессов, и зачастую в одновременном их проявлении на одной и той же территории. Использование стоимостных величин на всех этапах расчетов индикаторов обеспечивает их сопоставимость и, в итоге, обоснованность ИГБ.

Для расчета индекса города значения интегрального индикатора ( $B_{yg}$ ) приводятся к безразмерной величине. В случае, когда расчет показателей индекса осуществляется по неоднородной выборке в силу существенных природных и социально-экономических различий городов, целесообразно принимать во внимание среднее значение, рассчитываемое с учетом квадратического отклонения от арифметической середины значений ущерба по всей выборке. Тогда величина ИГБ, принимаемая за обратную величину ожидаемых последствий проявления опасных геоэкологических процессов, рассчитывается по формуле:

$$I_g^{\text{игб}} = \frac{1}{(B_{yg}/B_y^k)}, \quad (1)$$

где  $I_g^{\text{игб}}$  – индекс  $g$ -го города,  $B_{yg}$ ,  $B_y^k$  – соответственно, удельное значение геоэкологического ущерба  $g$ -го города и ущерба с учетом его квадратического отклонения от среднеарифметического значения по всей выборке городов.

Для многофакторной и объективной оценки ИГБ необходима достоверная количественная информация, но в настоящее время существующая открытая статистическая база явно недостаточна. Основными источниками информации для формирования БД по городам и последующей оценки ИГБ служат данные государственной статистики (Росстат, Росреестр) и сведения, раз-

мещенные на сайтах администраций муниципальных образований.

К числу основных показателей для оценки возможных последствий проявления природных процессов относится пораженная ими площадь в городах, информация о которой зачастую не отражается в официальной статистике. Такие сведения должны содержаться в данных геологических мониторингов (действуют не во всех городах), генпланах (разделы “Геологические условия”, “Инженерная подготовка территории”, “ЧС” и др.), экологических отчетах муниципальных образований (как правило, отсутствуют) и др. Систематизированная база подобных данных пока отсутствует, поэтому в практических расчетах целесообразно использовались результаты экспертных оценок, материалы собственных полевых исследований.

#### АПРОБАЦИЯ МЕТОДИЧЕСКОГО ПОДХОДА К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ИГБ

Объектами настоящего исследования являются территории городов. Выборка представлена 100 городами РФ с населением свыше 100 тыс. человек, расположенных в 71 субъекте в 8 федеральных округах. Общая численность населения городов выборки составляет 43% от городского населения страны. Выбранные города находятся в неодинаковых природно-климатических условиях, характеризуются различными социально-экономическими и экологическими, в том числе и геоэкологическими особенностями.

Определение ИГБ для модельных городов осуществлялось на основе интегрального индикатора, представляющего собой сумму ведущих индикаторов по четырем группам опасных геоэкологических процессов (ОГП): активизация природных процессов и загрязнение почв в зависимости от источников загрязняющих веществ (ЗВ): выбросы стационарных источников, временное размещение промышленных и коммунальных отходов, аварии на опасных объектах (табл. 1).

Общее число необходимых исходных показателей для оценки геоэкологической опасности города, учитывая разнообразие возможных видов последствий, составило порядка 400. Показатели могут быть расчетными (площадь загрязнения, площадь СЗЗ и др.) или нормативными (коэффициенты: категория и класс опасности, вероятность события, уязвимость территории) величинами.

Оценка ущерба от возможного негативного воздействия геологических процессов рассматривалась ранее в статье [5].

Для определения ущерба от загрязнения почв выбросами ЗВ необходимы данные об их объемах, классе опасности и категории опасности

<sup>8</sup> Национальный экологический рейтинг городов России: <https://greenpatrol.ru/ru/stranica-dlya-obshego-reytinga/ekologicheskij-reyting-subektov-rf?tid=453>

<sup>9</sup> Распоряжение Правительства РФ от 23.03.2019 № 510-р (ред. от 30.12.2020) Об утверждении Методики формирования индекса качества городской среды [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_320](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_320)

**Таблица 1.** Показатели и индикаторы ИГБ

| Показатель  | Индикатор  |
|---|--|
| 1. Группа природных процессов, активизируемых хозяйственной деятельностью   |  |
| Площадь процесса, га<br>Коэффициент уязвимости территории<br>Вероятность проявления процесса<br>Удельный нормативный ущерб для каждого процесса, тыс. руб./га   | Геоэкологическая опасность (удельное значение суммы ущербов по городу) при проявлении группы природных процессов, тыс. руб./га   |
| 2. Группа загрязнения почв выбросами от стационарных источников   |  |
| Площадь промплощадки стационарного источника токсичных выбросов, га<br>Площадь СЗЗ источника, га<br>Радиус распространения ЗВ, км<br>Объем выбросов ЗВ в атмосферу с учетом класса опасности, т<br>Нормативный ущерб загрязненных почв промышленным предприятием, тыс. руб./га                                    | Площадь почв, загрязненных токсикантами, в городе, га<br><br>Геоэкологическая опасность (удельное значение суммы ущербов по городу) от выбросов ЗВ в атмосферу промышленными предприятиями, тыс. руб./га |
| 3. Группа загрязнения почв от наземных опасных объектов   |  |
| Площадь складирования промышленных отходов с учетом класса опасности, га<br>Нормативный ущерб промышленных отходов, тыс. руб./га<br>Площадь полигонов ТКО, га<br>Нормативный ущерб ТКО, тыс. руб./га<br>Площадь прочих опасных объектов, га<br>Нормативный ущерб для соответствующих видов объектов, тыс. руб./га | Геоэкологическая опасность (удельное значение суммы ущербов от наземных опасных объектов по предприятиям и отраслям по городу), ТКО и др., тыс. руб./га  |
| 4. Группа загрязнения почв от потенциально аварийных объектов   |  |
| Количество потенциально аварийных объектов в городе, шт.<br>Вероятность проявления аварии<br>Нормативный ущерб, тыс. руб./авария  | Геоэкологическая опасность (удельное значение суммы ущербов от аварийных объектов по городу), тыс. руб./га   |
| <b>Интегральный индикатор</b> геоэкологической опасности<br>(удельное значение суммы ущербов по четырем группам ОГП в городе), тыс. руб./га   |  |

предприятия. В соответствии с законодательными актами площадь загрязнения почв выбросами нормативно соответствует площади санитарно-защитной зоны (СЗЗ). Токсичные промышленные отходы, как правило, временно размещаются на территории самого предприятия. Поэтому для расчетов необходимы сведения о площадях самого объекта и его СЗЗ. Кроме того, должна проводиться корректировка нормативного радиуса распространения выбросов ЗВ в соответствии с данными экологического мониторинга предприятий.

Полученные в результате расчетов индивидуальные значения ИГБ для городов по ф. (1) приводятся к 10-балльной шкале. Среднее значение ИГБ для всей выборки оценивается в 3.3 балла, чуть более 60% городов получили оценку ниже 5 баллов.

На следующем этапе было проведено ранжирование индивидуальных показателей ИГБ городов в баллах по 5 уровням геоэкологической безопасности: <0.75 – максимально опасный, 0.76–1.50 – опасный, 1.51–3.00 – минимально опасный, 3.01–6.00 – минимально безопасный, более 6.01 – безопасный.

Значения <0.75 баллов характерны, главным образом, для городов – центров горнодобывающей и металлургической промышленности. Самый низкий показатель ИГБ (0.15 баллов) определен для Старого Оскола из-за повышенной техногенной нагрузки (Стойленский карьер, ОЭМК, хвостохранилища и др.), сопровождающейся активизацией негативных природных процессов (депресссионная воронка, сезонное затопление территории и т.п.). Лидирующая позиция Мурманска (10 баллов) обусловлена геологическим

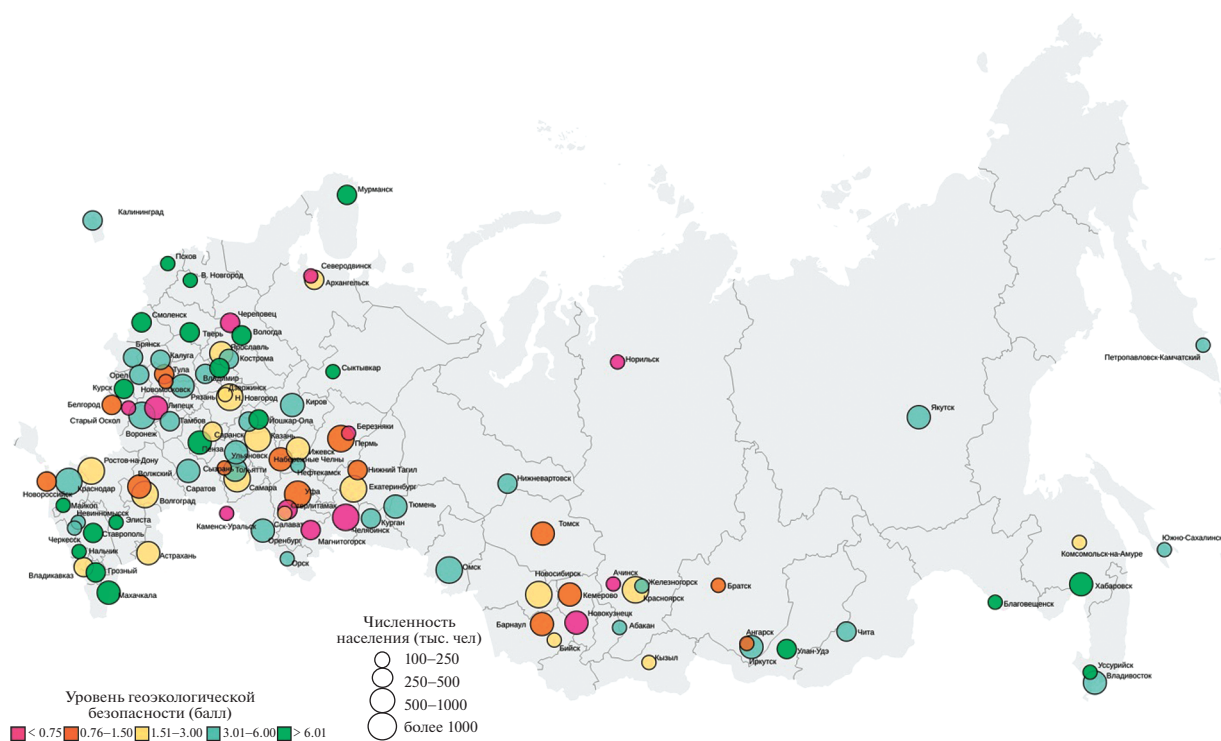


Рис. 2. Результаты оценки геоэкологической безопасности модельных городов России.

строением и спецификой горных пород, на которых слабо развиваются учитываемые в расчетах негативные природные процессы, на фоне относительно слабой техногенной нагрузки.

На рис. 2 представлено пространственное распределение значений ИГБ. По результатам расчетов, каждый пятый из выборки город может быть отнесен к группе геоэкологических безопасных. Половина городов выборки находится в переходной стадии от категории минимально опасных к категории минимально безопасных городов, среди них более 60% соответствуют категории минимально безопасных.

Отсутствие городов, относящихся к группе “максимально опасных” по уровню геоэкологической безопасности, характерно для Северо-Кавказского, Дальневосточного и Южного федеральных округов. Так, в Северо-Кавказском федеральном округе преобладают “безопасные” города, их доля здесь превышает 70% при среднем балле 5.2. Это может быть связано с относительно комфортными природными условиями и исторической экономической специализацией городов.

Для Уральского и Сибирского федеральных округов, напротив, типичны малочисленность группы “безопасных” городов (соответственно 25 и 13%) и лидерство по числу городов в группе “максимально опасных” при среднем значении ИГБ ниже среднего по всей выборке. Это объяс-

няется, с одной стороны, сложностью природных условий, а с другой — “накопленным экологическим следом” от воздействия многочисленных промышленных предприятий. В Северо-Западном федеральном округе города в основном распределены по двум контрастным группам: “максимально опасные” и “безопасные”. Это может быть связано с сильным различием в экономической специализации городов этого округа. Так, Псков, Великий Новгород и Вологда являются туристическими центрами, тогда как Северодвинск и Череповец — крупные промышленные центры (рис. 3).

Прослеживается также зависимость ИГБ от природных факторов. Именно природными особенностями обусловлено развитие ОГП в городах. Рассматриваемые города весьма разнообразны по геолого-геоморфологическим условиям, определяющим уязвимость территории, под которой понимается способность природно-техногенных систем к самовосстановлению после ограниченного по времени воздействия опасного процесса. Баллы уязвимости определялись экспертным путем. В результате локально уязвими оказались города Дальнего Востока и Европейского Севера. Тем не менее большую часть городов выборки (95%) по степени уязвимости их территории от ОГП можно считать безопасными или минимально безопасными. Совместный ана-



|                   | Средний индекс геоэкологической безопасности (балл) | Доля геоэкологически безопасных городов, % | Количество городов выборки, шт |
|-------------------|---|--|--------------------------------|
| Северо-Кавказский | 5.2   | 71   | 7                              |
| Центральный       | 4   | 61   | 18                             |
| Южный             | 3.2   | 38   | 8                              |
| Приволжский       | 3.2   | 35   | 23                             |
| Северо-Западный   | 3.5   | 30   | 10                             |
| Дальневосточный   | 2.9   | 30   | 10                             |
| Уральский         | 2.2   | 25   | 8                              |
| Сибирский         | 2   | 13   | 16                             |

Рис. 3. Распределение средних значений ИГБ и доли городов выборки с благоприятным геоэкологическим состоянием по федеральным округам.

лиз полученных значений ИГБ городов, в свою очередь включающих оценку ОГП, с оценкой уязвимости их территорий от природных процессов показал, что около 85% городов выборки относятся к группе “безопасных”. Значит, для большинства городов выборки по степени природной безопасности и с учетом уязвимости территории характерен высокий уровень безопасности и, как следствие, — качества жизни. Таким образом, выполненный анализ подтвердил предположение, что ИГБ напрямую связан не только с социально-экономическими характеристиками города, но и с особенностями его природных условий, влияющих на безопасное проживание человека.

### ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ОЦЕНКИ ГОРОДОВ И ИНДЕКС ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

В последнее время ежегодно проводятся рейтинги городов по их экологическому состоянию, комфортности проживания и т.д., выражаемые соответствующими индексами, рассчитываемыми по различным методикам и индикаторам [2, 7–10]. С целью повышения эффективности планирования городов и обоснования необходимости учета ИГБ в существующих информационно-аналитических системах оценки городской среды были проанализированы методики определения опубликованных экологических индексов и рейтингов городов России.

*Индекс качества жизни*<sup>10</sup> рассчитывается на основании значений более 200 показателей по 18 направлениям для 115 городов России. При этом используется международный опыт, в частности Организации экономического сотрудничества и развития (ОЭСР), включающий оценку достижения городами целей устойчивого развития и показателей индексов лучшей жизни и благополучия. Одним из направлений этих исследований

является “Хорошая экология и развитая система обращения с отходами в городе”. В направлении “Экология” учитываются 29 показателей оценки качества жизни: уровень загрязнения воздуха, изменение площади лесного покрова, качество питьевой воды, доля ТКО и т.п.

*Индекс качества городской среды*<sup>11</sup> — показатель оценки качества материальной городской среды и условий ее формирования. Он разрабатывается Министерством строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ и используется в реализации положений Указа Президента Российской Федерации от 21.07.2020 г. № 474 “О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года” и национального проекта “Жилье и городская среда”. Например, с помощью этого индекса идет определение размеров субсидий из федерального бюджета субъектам РФ на поддержку государственных и муниципальных программ формирования современной городской среды.

Этот индекс рассчитывается на основе оценки шести типов пространств (жилье, улично-дорожная сеть, озеленение и пр.) в соответствии с шестью критериями (безопасность, экологичность, и др.) качества городской среды. Из общей матрицы, оценивающей 36 индикаторов, анализировались только те, которые относились к экологическим характеристикам (доля ТКО, доля озеленения и уровень его состояния, качество питьевой воды и т.д.).

*Экологический рейтинг городов России*<sup>12</sup> составлен по данным опроса более 90 тыс. жителей 200 городов России в 2019 г. Жители городов оценивали состояние своих городов по 11 критериям, один из которых — экологическое состояние го-

<sup>10</sup>Индекс качества жизни. <https://citylifeindex.ru/>

<sup>11</sup>Индекс качества городской среды <https://индекс-городов.рф/#/methodology>

<sup>12</sup>Экологический рейтинг 200 городов России. [https://www.domofond.ru/statya/ekologicheskij\\_reyting\\_200\\_gorodov\\_rossii\\_za\\_2019\\_god/100219](https://www.domofond.ru/statya/ekologicheskij_reyting_200_gorodov_rossii_za_2019_god/100219)

рода, определяемое только двумя показателями: озеленение и состояние воздуха по 10-балльной шкале. В итоге средняя оценка экологической обстановки в городах, по мнению местных жителей, составила 6.6 баллов.

Рассмотренные выше индексы нацелены, главным образом, на отражение степени комфортности городов для их жителей, и не один из них не рассматривает городскую территорию с позиций оценки ее геоэкологической безопасности. Экологические индексы, косвенно отражающие безопасность городов, практически не учитывают возможную угрозу со стороны опасных геоэкологических процессов.

При сравнении балльных оценок индексов и экологического рейтинга между собой было выявлено, что практически во всех модельных городах по мнению местных жителей уровень экологического благополучия выше индекса качества городской среды, в некоторых городах более, чем на 4 балла, что свидетельствует об удовлетворенности местных жителей экологической обстановкой их городов. Скорее всего, это обусловлено субъективностью и недостаточной информированностью жителей и органов местной власти о реальном геоэкологическом состоянии городского пространства. Поэтому отражаемое таким образом экологическое состояние городов из-за недоучета геоэкологических факторов может быть существенно хуже.

При сравнении балльных оценок всех индексов отмечается, что большинство городов имеет ИГБ ниже экологических индексов. Очевидно, в рассмотренных выше информационно-аналитических системах не учитываются: уязвимость городской территории от опасных природных процессов, потенциальный ущерб от их проявления и проявления техногенных процессов, площади загрязненных городских почв и др., т.е. то, что определяет экологическую, включая геоэкологическую безопасность городов. Поэтому учет ИГБ при оценке экологического состояния города ухудшит показатели – чем ниже балл ИГБ, тем хуже качество городской среды.

Отличие ИГБ от других индексов заключается в многообразии и сложности взаимосвязей природных и техногенных процессов, зачастую в одновременном их проявлении на одной и той же территории. Кроме того, в отличие от показателей в рассмотренных информационно-аналитических системах, измеряемых в собственных физических единицах, переводимых в баллы, использование при определении ИГБ стоимостных величин на всех этапах расчетов индикаторов обеспечивает их сопоставимость и в итоге обоснованность оценки индекса.

Проведенный анализ индексов выявил различия в перечне экологических параметров, прак-

тическое отсутствие геоэкологических показателей и, как следствие, невозможность комплексной оценки общей экологической безопасности городских пространств. Таким образом, объективное сравнение городов РФ по экологическим индексам и рейтингам возможно лишь при разработке единого набора показателей и учете в их числе геоэкологических факторов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан методический подход к определению Индекса геоэкологической безопасности города, позволяющий корректировать экологические рейтинги городов. На примере представительной выборки модельных городов показаны его действенность и оригинальность выбора в качестве основы для расчета ИГБ – интегрального индикатора, оцениваемого по критерию минимального потенциального ущерба от опасных геоэкологических процессов.

Результаты расчета ИГБ показали, что только каждый пятый город выборки по состоянию в настоящее время можно отнести к геоэкологически безопасным. В то же время, учитывая преобладание в выборке городов с максимальной техногенной нагрузкой (города-субъекты РФ не рассматривались), а также учитывая, что около 50% городов находятся в переходной стадии от категории минимально опасных к категории минимально безопасных, с позиций геоэкологической оценки можно сделать вывод о преобладании в России безопасных городов.

ИГБ можно использовать для ранжирования городов и их сравнения по уровню геоэкологической безопасности в единой системе показателей.

Перечень предложенных показателей и индикаторов геоэкологической безопасности представляют собой открытую систему, которую можно совершенствовать и дополнять новыми показателями.

Использование ИГБ потребует расширить и узаконить доступный перечень статистических показателей на уровне отдельных городов, что в свою очередь будет способствовать стимулированию получения и анализа более полной информации о состоянии городской среды.

Результаты анализа существующих в открытом доступе различных экологических оценок, выраженных комплексными индексами или экологическими рейтингами городов России, показали низкую сопоставимость этих значений между собой и с рассчитанными значениями ИГБ.

Выполненный анализ подтвердил необходимость дальнейшего развития существующих комплексных индексов и рейтингов по оценке городского пространства, повышение их информативности и доступности данных, обеспечивающих

объективную экологическую, в том числе геоэкологическую оценку городов. Следовательно, интеграция ИГБ в существующие информационно-аналитические системы позволит расширить доступный перечень статистических показателей на уровне отдельных городов, это в свою очередь приведет к повышению эффективности решения экологических проблем при планировании и проектировании городов.

*Статья подготовлена в рамках выполнения государственного задания ИГЭ РАН по теме НИР № г.р. 122022400104-2 “Техногенез и природа: геоэкологические проблемы”.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арустамов Э.А. Рейтинги и критерии оценки экологического состояния городов и регионов России // *Науковедение*. 2017. Т. 9. № 4. <http://naukovedenie.ru/PDF/41EYN417.pdf> (дата обращения: 21.07.2022).
2. Бобылев Н.Г., Гадаль С., Коновалова М.О., Сергунин А.А. и др. Ранжирование регионов арктической зоны Российской Федерации по индексу экологической безопасности // *Север и Рынок: формирование экономического порядка*. 2020. № 3 (69). С. 17–40. <https://doi.org/10.37614/2220-802X.2.2020.69.002>
3. Заиканов В.Г., Минакова Т.Б., Булдакова Е.В. Природно-техногенные геоэкологические опасности в городе: формирование, динамика, воздействие // *Геоэкология*. 2021. № 5. С. 45–59. <https://doi.org/10.31857/S086978092105009X>
4. Заиканов В.Г., Минакова Т.Б., Булдакова Е.В. Геоэкологические процессы в городе и оценка их опасности // *Геоэкология*. 2022. № 3. С. 82–96. <https://doi.org/10.31857/S0869780922030109>
5. Минакова Т.Б., Заиканов В.Г., Булдакова Е.В. Геоэкологический след в городах России: подходы, оценки, результаты // *Геоэкология*. 2020. № 6. С. 83–94. <https://doi.org/10.31857/S0869780920060065>
6. Минакова Т.Б., Заиканов В.Г., Булдакова Е.В. Подход к оценке загрязнения почвенного компонента природно-техногенных систем для геоэкологической безопасности города // *Геоэкология*. 2021. № 6. С. 89–96. <https://doi.org/10.31857/S0869780921060060>
7. Павликова О.В., Ферару Г.С. Методология определения экологических возможностей устойчивого развития региона // *Экономика. Информатика*. 2012. № 1 (120). С. 42–50.
8. Рейтинг устойчивого развития городов России, 2020. Вып. 8. <https://www.agencysgm.com/upload/iblock/513/51385c0f0ec17be0a989b7f371e928ca.pdf>
9. Рожков М.М. Индексы и индикаторы устойчивого развития как элемент качества жизни населения Российской Федерации // *Экономика, статистика и информатика*. 2015. № 2. С. 113–117.
10. Тронин А.А. Ранжирование регионов России по уровню экологической безопасности // *Региональная экология*. 2019. № 1 (55). С. 5–12. <https://doi.org/10.30694/1026-5600-2019-1-5-12>
11. Michalina D., Mederly P., Diefenbacher H., Held B. Sustainable Urban Development: A Review of Urban Sustainability Indicator Frameworks. *Sustainability*. 2021; 13 (16): 9348. <https://doi.org/10.3390/su13169348>

## GEOENVIRONMENTAL SAFETY INDEX OF RUSSIAN CITIES: CRITERIA, INDICATORS AND ASSESSMENT

E. V. Buldakova<sup>a, #</sup>, V. G. Zaikanov<sup>a</sup>, T. B. Minakova<sup>a</sup>, and Yu. P. Prokopenko<sup>a</sup>

<sup>a</sup> *Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences, Ulanskii per., 13, str. 2, Moscow, 101000 Russia*

<sup>#</sup> *E-mail: e\_buldakova@mail.ru*

The article discusses a methodological approach to determining the Geoenvironmental Safety Index (GSI) tested at a representative sampling of Russian cities. The analysis of existing approaches and methods for determining integral environmental indices both in Russia and abroad showed the absence of geoenvironmental factors expressed in specific indicators. The parameters were substantiated that reflect urban geoenvironmental status based on the of geoenvironmental hazard assessment for 100 Russian cities tested, and the quantitative values of GSI were calculated. A comparison of environmental indices currently used in the Russian information and analytical systems pointed to significant differences in the list of environmental parameters accounted for, in particular, the practical absence of geoenvironmental indicators or characteristics and the disparity of the scores obtained in these systems for the same cities. To solve the problems in sustainable urban development more efficiently, it is necessary to integrate IGB data into existing information and analytical systems for assessing the ecological state of Russian cities.

**Keywords:** *geoenvironmental hazard/safety, index of geoenvironmental safety, geoenvironmental safety indicator, Russian cities*

## REFERENCES

1. Arustamov, E.A. *Reitingi i kriterii otsenki ekologicheskogo sostoyaniya gorodov i regionov Rossii* [Ratings and criteria for assessing the ecological status of cities and regions of Russia]. *Naukovedenie*, 2017, vol. 9, no 4. <http://naukovedenie.ru/PDF/41EVN417.pdf> (accessed: 21.07.2022). (in Russian)
2. Bobylev, N.G., Gadal, S., Konovalova, M.O. et al. *Ranzhirovanie regionov Arkticheskoi zony Rossiiskoi Federatsii po indeksu ekologicheskoi bezopasnosti* [Regional ranking of the Russian Arctic zone by the environmental safety index]. *Sever i rynek: formirovanie ekonomicheskogo poryadka*, 2020, 69 (3), pp. 17–40. (in Russian)
3. Zaikanov, V.G., Minakova, T.B., Buldakova, E.V. *Prirodno-tekhnogennye geoekologicheskie opasnosti v gorode: formirovanie, dinamika, vozdeistvie* [Natural and technogenic-geoecological hazards in the city: formation, dynamics, impact]. *Geoekologiya*, 2021, no. 5, pp. 45–59. (in Russian)
4. Zaikanov, V.G., Minakova, T.B., Buldakova, E.V. *Geoekologicheskie protsessy v gorode i otsenka ikh opasnosti* [Geoenvironmental processes in the city and assessment of their hazard]. *Geoekologiya*, 2022, no. 3, pp. 82–96. (in Russian)
5. Minakova, T.B., Zaikanov, V.G., Buldakova, E.V. *Geoekologicheskii sled v gorodakh Rossii: podkhody, otsenki, rezul'taty* [Geoecological footprint in Russian cities: approaches, assessments, and results]. *Geoekologiya*, 2020, no. 6, pp. 83–94. (in Russian)
6. Minakova, T.B., Zaikanov, V.G., Buldakova, E.V. *Podkhod k otsenke zagryazneniya pochvennogo komponenta prirodno-tekhnogennykh system dlya geoekologicheskoi bezopasnosti goroda* [The approach to assessing pollution of soil component in natural-anthropogenic systems for urban geoenvironmental safety]. *Geoekologiya*, 2021, no. 6, pp. 89–96. (in Russian)
7. Pavlikova, O.V., Feraru, G.S. *Metodologiya opredeleniya ekologicheskikh vozmozhnostei ustoichivogo razvitiya regiona* [Methodology for determining environmental opportunities for sustainable development of the region]. *Ekonomika. Informatika*, 2012, no. 1 (120), pp. 42–50. (in Russian)
8. Rating of sustainable development of Russian cities, 2020. <https://www.agencysgm.com/upload/iblock/513/51385c0f0ec17be0a989b7f371e928ca.pdf> (accessed: 07/29/2022). (in Russian)
9. Rozhkov, M.M. *Indeksy i indikatory ustoichivogo razvitiya kak element kachestva zhizni naseleniya Rossiiskoi Federatsii* [Indices and indicators of sustainable development as an element of the life quality of the Russian Federation population]. *Ekonomika, statistika i informatika*. 2015, no. 2, pp. 113–117. (in Russian)
10. Tronin, A.A. *Ranzhirovanie regionov Rossii po urovnyu ekologicheskoi bezopasnosti* [Ranking of Russian regions by the environmental safety level]. *Regional'naya ekologiya*, 2019, no. 1 (55), pp. 5–12. <https://doi.org/10.30694/1026-5600-2019-1-5-12>. (in Russian)
11. Michalina, D., Mederly, P., Diefenbacher, H., Held, B. Sustainable urban development: a review of urban sustainability indicator frameworks. *Sustainability*, 2021, no. 13 (16), p. 9348. <https://doi.org/10.3390/su13169348>.