

СОДЕРЖАНИЕ

Номер 5, 2022

Мониторинг инженерно-геологических и сейсмических свойств грунтов при строительстве и эксплуатации олимпийских сооружений (г. Сочи, Имеретинская низменность)

Б. А. Трифонов, С. Ю. Милановский, В. В. Несынов

3

ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ ПРИРОДНЫХ И ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Зоны влияния поверхностного стока в системе городского природопользования (на примере территории Москвы)

Е. А. Карфидова, Г. И. Батрак, А. П. Сизов, М. Н. Комаревская, С. Н. Полеводова

14

ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

Оценка глубинного и скоростного строения геологической среды по результатам сейсмоэкологического мониторинга

М. Г. Попов, В. М. Макеев, О. Г. Попова

27

ЗАГРЯЗНЕНИЕ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

Закономерности распределения токсичных элементов в почвах населенных пунктов горнорудных территорий восточного Забайкалья

Б. Н. Абрамов, Т. Г. Цыренов

39

УТИЛИЗАЦИЯ И ЗАХОРОНЕНИЕ ОТХОДОВ

Оценка состояния полигона ТКО для обоснования мониторинговых исследований в пострекультивационный период

И. В. Галицкая, В. С. Путилина, И. А. Костикова

49

Влияние наводнения 2019 г. на абиотическую и биотическую структуру донных отложений и почв поймы р. Амур

Л. А. Гаретова, Г. В. Харитонова, Е. Л. Имранова, Н. К. Фишер, О. А. Кириенко

61

ГРУНТОВЕДЕНИЕ И МЕХАНИКА ГРУНТОВ

Оценка влияния газонасыщенности поровых вод на физические свойства связных дисперсных (глинистых) грунтов методом смешивания с цеолитами

А. А. Кудяев, Ф. С. Карпенко, Д. В. Корост, О. Н. Видищева, М. М. Кучуков

73

МЕТОДОЛОГИЯ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Особенности расчетов устойчивости склона при образовании нового оползневого блока

Г. П. Постоев, А. И. Казеев, М. М. Кучуков

87

Contents

Number 5, 2022

Monitoring of engineering geological and seismic properties of soils during construction and operation of olympic facilities (Sochi, Imeretian lowland)

B. A. Trifonov, S. Yu. Milanovskii, V. V. Nesynov

3

FUNCTIONING OF NATURAL AND NATURAL-ANTHROPOGENIC SYSTEMS

Influence of surface runoff zones in the system of urban nature management (by the example of the Moscow city)

E. A. Karfidova, G. I. Batrak, A. P. Sizov, M. N. Komarevskaya, S. N. Polevodova

14

NATURAL AND HUMAN-INDUCED PROCESSES

Local seismo-ecological monitoring results in connection with to the geological environment assessment

M. G. Popov, V. M. Makeev, O. G. Popova

27

ENVIRONMENT CONTAMINATION

Patterns of toxic element distribution in soils of settlements in the Eastern Transbaikalia mining areas

B. N. Abramov, T. G. Tsyrenov

39

UTILIZATION AND DISPOSAL OF WASTE

Assessment of MSW lanfill state for substantiation of monitoring in post-rehabilitation period

I. V. Galitskaya, V. S. Putilina, I. A. Kostikova

49

The impact of the 2019 flood on the abiotic and biotic structure of bottom sediments and soils in the Amur river floodplain

L. A. Garetova, G. V. Kharitonova, E. L. Imranova, N. K. Fischer, O. A. Kirienko

61

SOIL AND ROCK ENGINEERING AND MECHANICS

Evaluation of the effect of pore water saturation with gas on physical properties of fine coherent (clay) soils by mixing with zeolites

A. A. Kudaev, F. S. Karpenko, D. V. Korost, O. N. Vidishcheva, M. M. Kuchukov

73

RESEARCH METHODS AND TECHNIQUES

Peculiarities of slope stability calculations upon the formation of a new landslide block

G. P. Postoev, A. I. Kazeev, M. M. Kuchukov

87

УДК 550.34.016

МОНИТОРИНГ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ И СЕЙСМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГРУНТОВ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ОЛИМПИЙСКИХ СООРУЖЕНИЙ (г. СОЧИ, ИМЕРЕТИНСКАЯ НИЗМЕННОСТЬ)

© 2022 г. Б. А. Трифонов^{1,*}, С. Ю. Милановский^{1,2,**}, В. В. Несынов¹¹ Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН,
Уланский пер., 13, стр. 2, Москва, 101000 Россия² Институт физики Земли РАН им. О.Ю. Шмидта РАН,
Б. Грузинская ул., 10, стр. 1, Москва, 123242 Россия

*E-mail: igelab@mail.ru

**E-mail: svetmil@mail.ru

Поступила в редакцию 14.07.2022 г.

После доработки 08.08.2022 г.

Принята к публикации 11.08.2022 г.

Проведен анализ результатов мониторинга сейсмических свойств типичных и неблагоприятных в инженерно-геологическом отношении грунтовых комплексов на Имеретинской низменности в период как строительства, так и эксплуатации олимпийских сооружений. Показано, как под влиянием техногенных факторов и благодаря возросшей детальности исследований менялись первоначальные представления о сейсмических свойствах грунтов II–III категории во время строительства и последующей эксплуатации олимпийских сооружений в 2011–2014 гг. На территорию размещения олимпийских объектов прибрежного кластера построена серия карт-схем сейсмического микрорайонирования (СМР), учитывающих эти изменения. Рассчитаны характеристики реакции геологической среды на сильные землетрясения по состоянию на период с 1986–1996 гг. (начало работ на участках перспективного освоения территории г. Сочи) по 2021 г. (после строительства и эксплуатации основных олимпийских объектов). Показано, что на отдельных участках с преобладающими в разрезе грунтами II–III категории по сейсмическим свойствам уже через 4–5 лет отмечен устойчивый тренд ухудшения, по сравнению с 2007 г., сейсмических свойств грунтов в сторону III категории. Приращение сейсмической интенсивности увеличилось на 0.5–0.7 балла. Для снижения негативного влияния сильных землетрясений на динамически неустойчивые грунты, где возможна потеря несущей способности грунтового основания за счет эффекта сейсмического разжижения, необходимо осуществлять превентивные мероприятия по улучшению сейсмических свойств грунтов. В процессе строительства необходимо предусматривать уплотнение таких грунтов путем создания, например, искусственного массива со свайным фундаментом.

Ключевые слова: сейсмическое микрорайонирование, скорости поперечных волн, техногенные воздействия, расчетные методы, акселерограммы, искусственное улучшение грунтов оснований

DOI: 10.31857/S0869780922050083

ВВЕДЕНИЕ

В соответствии с нормативными картами ОСР-97(2015 А, В) и СП 14.13330.2018 территория г. Сочи с окрестностями относится, в привязке к средним грунтовым условиям по шкале MSK-64 к зонам 8-балльной сейсмичности при повторяемости землетрясений 1 раз в 500 лет и 9-балльной сейсмичности при повторяемости землетрясений 1 раз в 1000 лет. Карты ОСР-97(2015) составлены в кондициях масштаба 1:2500000 на основе расчета степени сейсмической опасности, выраженной в непрерывно изменяющихся по площади чис-

ленных значениях баллов, но в окончательном виде они отражают лишь целочисленные значения сейсмической интенсивности. Как признает автор карт В.И. Уломов [10], процедура такого “округления” влечет за собой погрешности, нередко превышающие ± 0.5 балла.

На основе базы данных ОСР-97 для района Сочи В.И. Уломовым [10] выполнен вероятностный анализ сейсмической опасности (ВАСО) в параметрах сейсмической интенсивности (I) в баллах шкалы MSK-64 с детализацией до 0.1 балла и в значениях пиковых ускорений A_{\max} (см/с²)



Рис. 1. Территория Имеретинской низменности после начала ее освоения для строительства олимпийских сооружений.

для периодов повторяемости сильных землетрясений $T = 500$ и $T = 1000$ лет в привязке к грунтам II категории по сейсмическим свойствам. В соответствии с ВАСО исходная (фоновая) сейсмическая интенсивность (сотрясаемость) для территории Имеретинской низменности составляет $I = 8$ ($T = 500$ лет) и $I = 8.5$ ($T = 1000$ лет) баллов.

Большая часть территории Имеретинской низменности (рис. 1) представляла собой в конце 1980-х и начала 1990-х годов участки, перекрытые оросительными канавами, где выращивались овощные культуры местного совхоза. Естественная влажность грунта 72.4%. Постоянный водоносный горизонт фиксировался на глубинах от 0.5 до 2.5 м. Геологический разрез в заболоченных понижениях, которые использовались под сельскохозяйственные угодья, представлен лагунными осадками, ниже которых залегают пластичные иловатые глины с линзами песка и гравия, прослоями илов и торфяников общей мощностью 15–30 м. Ниже грунтовый массив представлен суглинками, супесями, глинами с редкими включениями щебня и дресвы. Общая мощность отложений 80–100 м [1]. С учетом геологического строения, гидрогеологических условий, литологического состава отложений и их физико-механических свойств грунты были отнесены к III категории по сейсмическим свойствам.

По результатам исследований 1986–1996 гг. приращение балльности по методу сейсмических

жесткостей (МСЖ) составили $\Delta I = +1.05$ – $+1.30$ балла (средневзвешенная скорость до глубины 30 м равна $V_{s30} = 150$ – 160 м/с, средневзвешенная плотность $\rho = 1.55$ – 1.65 г/см³). При расчете реакции геологической среды на воздействия сильных землетрясений [6–8] максимальные значения ускорений: от близких зон ВОЗ составили $A_{\max} = 450$ см/с²; от относительно удаленной Сухумской зоны ВОЗ – 465 см/с². Фрагмент карты сейсмического микрорайонирования (СМР), разработанной по результатам исследований 1986–1996 гг., приведен на рис. 2.

Цель ниже изложенных результатов – показать влияние техногенных факторов и детальных исследований на изменение первоначальных представлений о сейсмических условиях на слабых грунтах Имеретинской низменности (III категории по сейсмическим свойствам), а также обратить внимание на возможность улучшения несущей способности таких грунтов (их уплотнения) для дальнейшего освоения рассматриваемой территории путем создания массивов со свайным фундаментом и интенсивного понижения уровня подземных вод.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В 2007 г. было проведено сейсмическое микрорайонирование территории Имеретинской низ-

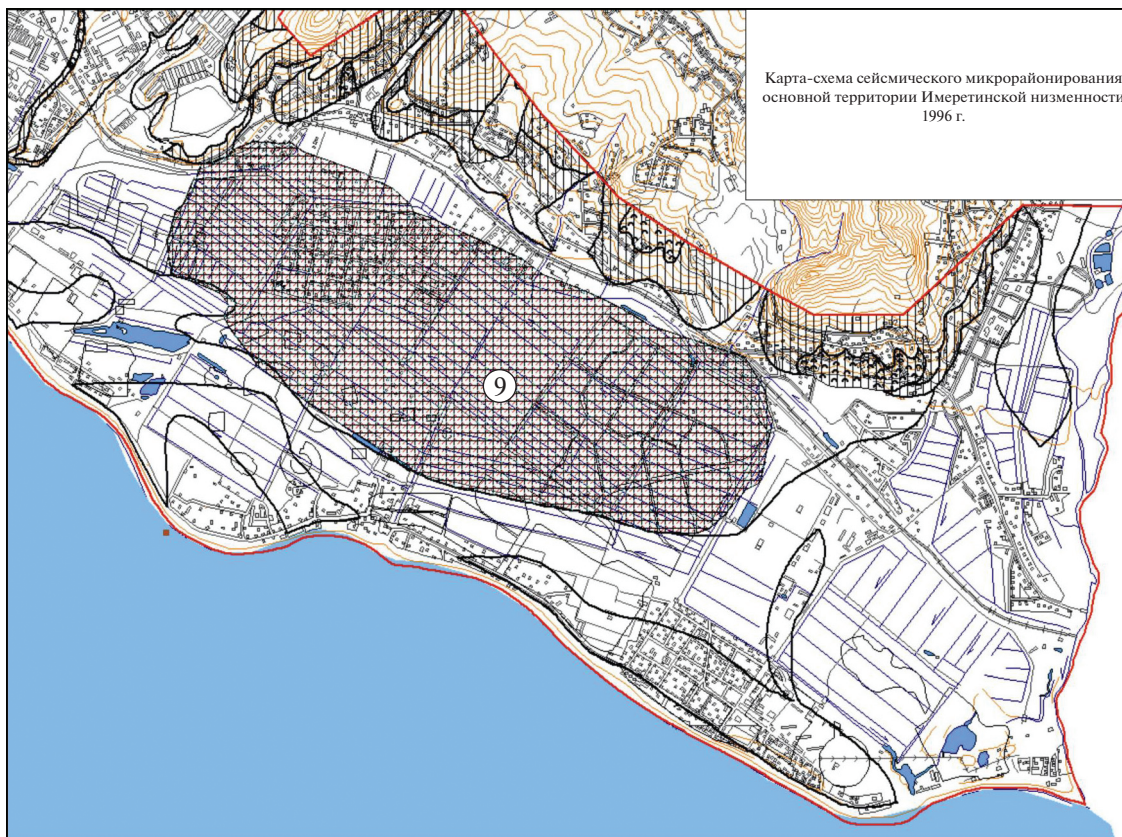


Рис. 2. Фрагмент карты-схемы СМР территории Имеретинской низменности (1996 г.). Участок с сейсмичностью 9 баллов выделен густой штриховкой; красный контур – граница территории Имеретинской низменности.

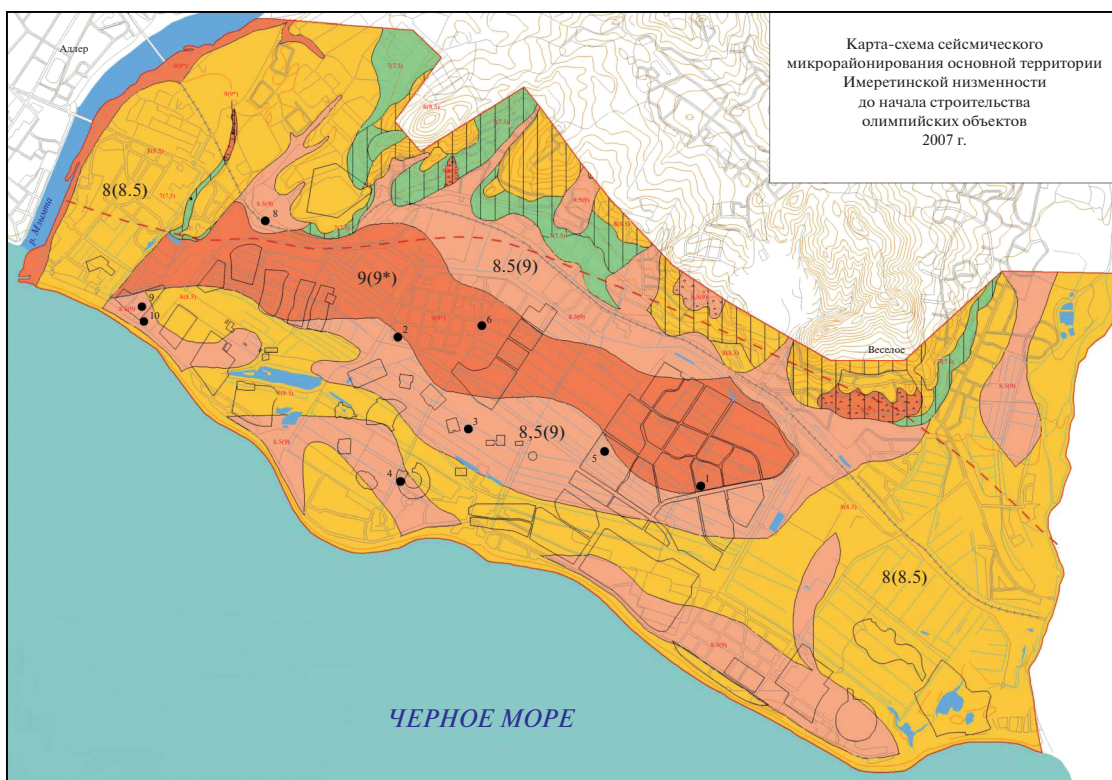
менности в масштабе 1:10000, предназначенное для выбора наиболее благоприятных в сейсмическом отношении участков размещения олимпийских объектов. При изысканиях было установлено, что при подготовке рассматриваемой территории под строительство на ряде участков с грунтами III категории были улучшены первоначальные сейсмические условия в результате проведения мелиоративных и планировочных работ (замена грунтов III категории насыпными с последующим их уплотнением).

После проведения новых исследований по СМР для целей размещения олимпийских объектов [9] и на основании комплексных исследований за более чем 20 лет, начиная с 1986 г., в 2007 г. была построена карта СМР территории Имеретинской низменности масштаба 1:10000, приведенная ниже на рис. 3, вид которой существенно изменился по сравнению с картой 1996 г. В местах предполагаемого размещения олимпийских сооружений после проведения водопонижения и замены верхней части грунтов III категории, где было возможно, выделены участки с грунтами II–III категории с сейсмичностью $I = 8.5$ баллов при повторяемости 1 раз в 500 лет и 9 баллов при повторяемости 1 раз в 1000 лет для ответственных сооружений, а также участки с не-

измененными грунтами III категорий по сейсмическим свойствам с сейсмичностью соответственно 9 и 9* баллов.

Участки с грунтами II–III категории (зона 3, см. условные обозначения к рис. 3) сложены разнородными песками, глинами, суглинками с прослоями гравийно-галечниковых грунтов, грунтовые воды на глубине от 3 до 5 м. Общая мощность отложений 60–80 м. Приращения балльности по СМР относительно эталонных грунтов II категории составили $\Delta I = +0.35$ – $+0.52$ балла ($V_{s30} = 230$ – 250 м/с при $\rho = 1.75$ – 1.90 г/см³). Здесь возможны максимальные значения ускорений: от близких зон ВОЗ $A_{max} = 295$ см/с² и от Сухумской зоны – 285 см/с².

Участки с грунтами III категорий 9 и 9* баллов (зона 4) сложены пластичными иловатыми глинами с линзами песка и гравия, прослоями илов и торфяников, суглинками, супесями, глинами с редкими включениями щебня и дресвы, грунтовые воды на глубине 1–4 м, где $\Delta I = +1.0$ – $+1.20$ балла ($V_{s30} = 160$ – 165 м/с при $\rho = 1.60$ – 1.65 г/см³). Общая мощность отложений 80–100 м, на них возможны максимальные значения ускорений: от близких зон ВОЗ $A_{max} = 415$ см/с² и от Сухумской зоны ВОЗ – 455 см/с².



Условные обозначения

<div style="border: 1px solid black; background-color: #90EE90; padding: 5px; display: inline-block; margin-bottom: 10px;">7(7.5)</div> <p>1 – Зона с сейсмичностью 7 баллов при повторяемости землетрясений 1 раз в 500 лет и 7.5 баллов при повторяемости 1 раз в 1000 лет</p>	<div style="border: 1px solid black; background-color: #FFDAB9; padding: 5px; display: inline-block; margin-bottom: 10px;">8.5(9)</div> <p>3 – Зона с сейсмичностью 8.5 баллов при повторяемости землетрясений 1 раз в 500 лет и 9 баллов при повторяемости 1 раз в 1000 лет</p>
<div style="border: 1px solid black; background-color: #FFD700; padding: 5px; display: inline-block; margin-bottom: 10px;">8(8.5)</div> <p>2 – Зона с сейсмичностью 8 баллов при повторяемости землетрясений 1 раз в 500 лет и 8.5 баллов при повторяемости 1 раз в 1000 лет</p>	<div style="border: 1px solid black; background-color: #FF8C00; padding: 5px; display: inline-block; margin-bottom: 10px;">9(9*)</div> <p>4 – Зона с сейсмичностью 9 баллов при повторяемости землетрясений 1 раз в 500 лет и 9* баллов (более 9 баллов) при повторяемости 1 раз в 1000 лет</p>
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block; margin-bottom: 10px;">●⁵</div> <p>Место и номер экспериментальных исследований</p>	

Рис. 3. Карта-схема СМР территории Имеретинской низменности (2007 г.) после подготовки территории под строительство олимпийских объектов.

Впоследствии при решении задач СМР на территории Имеретинской низменности непосредственно под объекты строительства проводились дополнительно крупномасштабные инженерно-геологические исследования. Кроме того, для расчетов антисейсмических мероприятий для отдельных объектов потребовались более детальные геофизические исследования. Авторами было проведено обобщение результатов крупномасштабных инженерно-геологических и геофизических исследований по СМР на ряде площадок в пределах Имеретинской низменности, выполненных в период с 2007 по 2012 г. Результаты экспериментальных исследований сейсмических свойств грунтовых комплексов в различных местах строи-

тельства олимпийских сооружений, проведенные до начала строительства и через 4–5 лет, показали изменения первоначальных сейсмических условий из-за ухудшения свойств грунтов верхней части разреза. Примером могут служить работы по СМР на участках строительства олимпийских гостиничных комплексов (“Апарт-отель” в 2011 г. и “Четырехзвездный комплекс на 700 номеров” в 2012 г.) на грунтах II–III категории с первоначальной сейсмичностью по карте СМР 2007 г. 8.5 (9) баллов. Инженерно-сейсмические исследования показали, что по прошествии времени грунты по сейсмическим свойствам уже следовало относить к III категории, так как средневзвешенная объемная плотность стала равной

$\rho = 1.70\text{--}1.75 \text{ г/см}^3$, а средние значения скоростей V_{s30} уменьшились до значений 180–200 м/с. При этом значения приращения сейсмической интенсивности возросли до $\Delta I = +0.60\text{--}+0.85$ балла, а A_{\max} по расчетам увеличились с 305–330 см/с² до 380 см/с² (от близких зон ВОЗ) и от Сухумской зоны ВОЗ от 300–335 см/с² до 380–390 см/с². Таким образом, результаты дополнительных детальных исследований (под конкретные сооружения) показали возможность изменения первоначальных представлений о сейсмических свойствах грунтов.

Экспериментальные исследования свойств грунтов [5] территории Центрального Олимпийского стадиона [5] показали наличие на Имеретинской низменности грунтов, которые подвержены риску сейсмического разжижения во время землетрясений (интенсивных сейсмических нагрузок). Наличие таких грунтов может привести к катастрофическим осадкам грунтовых оснований сооружений, что повлияет на их эксплуатационную надежность и способно привести к их разрушению.

Известно, что увеличению риска сейсмического разжижения грунтов способствует техногенное повышение уровня грунтовых вод (УГВ), а также возможное проявление барражного эффекта от возводимых фундаментов олимпийских зданий и сооружений.

К техногенным факторам, влияющим на грунтовый массив, помимо этого, можно отнести ухудшение прочностных и деформационных свойств грунтов оснований сооружений. При замене грунтов естественного сложения на насыпные в результате проведения планировочных работ для строительства ухудшаются первоначальные физико-механические свойства массива. При сильных землетрясениях возможна деформация грунтов оснований сооружений, возводимых на насыпных грунтах обратной засыпки, и также возрастает риск их сейсмического разжижения. На основании выполненных исследований авторы составили детальную карту-схему СМР для современной поверхности Имеретинской низменности с учетом проведенных дополнительных крупномасштабных исследований сейсмических свойств грунтов и влияния техногенных факторов — интенсивного строительства и эксплуатации сооружений, построенных после 2007 г. (рис. 4).

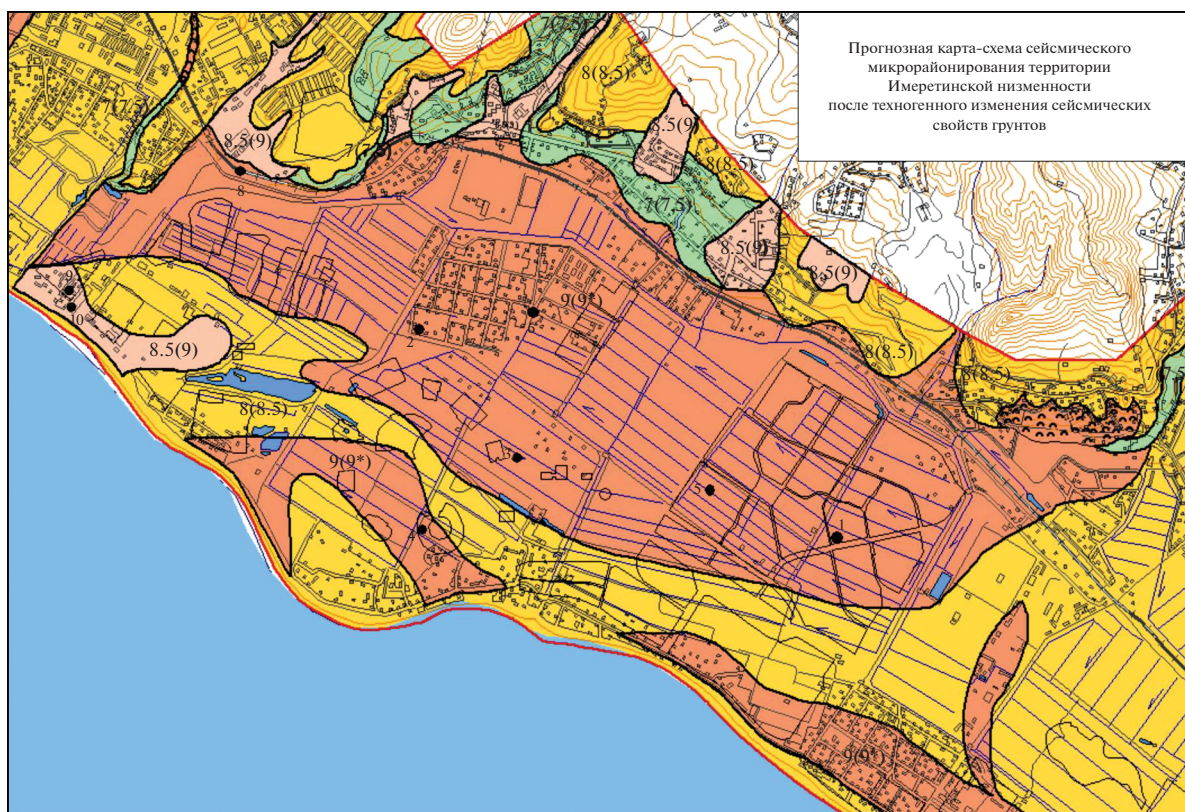
На новой карте с учетом данных мониторинга отмечены произошедшие с течением времени изменения на поверхности грунтовых комплексов под действием техногенных факторов после сооружения и эксплуатации олимпийских объектов по сравнению с картой СМР 2007 г. Увеличение территории с грунтами III категории и сейсмичностью 9(9*) баллов связано с тем, что часть участков с грунтами II–III категории (по состоянию на 2007 г.) по своим свойствам стали ближе к грунтам III категории, и по результатам исследо-

ваний 2010–2014 гг. они могут быть отнесены к участкам с грунтами зоны 4. Площадки и расположение участков с грунтами II–III, II категорий и соответствующей сейсмичностью 8.5 (9) и 8 (8.5) баллов, относящиеся к зонам 3 и 2 (см. рис. 4), не претерпели существенных изменений.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ИСКУССТВЕННОМУ УЛУЧШЕНИЮ ГРУНТОВ ОСНОВАНИЙ ПОД ФУНДАМЕНТАМИ СООРУЖЕНИЙ

В ходе исследований авторы видели свою задачу не только в прогнозе изменения сейсмических условий под действием техногенных факторов, но и в выработке предложений по снижению негативного влияния последних для улучшения сейсмических условий на изучаемой территории. Известно, что искусственно подготовленное основание в большинстве случаев позволяет снизить сейсмичность площадки и вести строительство в районах с сейсмичностью 9 баллов и более. На динамически неустойчивых грунтах, где возможна активизация просадочных процессов, для улучшения грунтов основания и снижения риска сейсмического разжижения, кроме мероприятий по водопонижению, проводят уплотнение грунтов путем создания искусственного свайного поля. Могут быть использованы также методы химического закрепления грунтов оснований (закрепление геокомпозитным материалом, цементацией и т.п.).

В статье В.А. Ильичева и др. [3] приводятся результаты расчетной оценки влияния искусственного улучшения грунтового основания на интенсивность и спектральный состав сейсмических колебаний. Расчетная оценка, основанная на конечноэлементной реализации, позволила определить размеры площадей, на которых необходимо проводить инженерную подготовку оснований с тем, чтобы перевести грунты III категории по сейсмическим свойствам во II категорию. Были проведены численные исследования по оценке влияния величины и характеристик включений в грунтовое основание на интенсивность и спектральный состав сейсмических воздействий. В качестве расчетного воздействия использовалась акселерограмма землетрясения Сан-Фернандо. Моделировались основания, подготовленные с помощью грунтонабивных свай или грунтовых подушек, а также химического закрепления. Из проведенного анализа следует, что величина максимальных средних ускорений на поверхности включения зависит от размеров включения, причем оптимальная ширина включения, при которой ускорения имеют наименьшие значения, равна полуторной толщине слоя. Увеличение ширины включения более чем на три толщины слоя не изменяет амплитуды ускорений. Также было установлено, что искусственная под-



Условные обозначения

<div style="border: 1px solid black; background-color: #90EE90; padding: 5px; display: inline-block; margin-bottom: 10px;">7(7.5)</div> <div style="border: 1px solid black; background-color: #FFD700; padding: 5px; display: inline-block; margin-bottom: 10px;">8(8.5)</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block; margin-bottom: 10px;">5</div>	<p>1 – Зона с сейсмичностью 7 баллов при повторяемости землетрясений 1 раз в 500 лет и 7.5 баллов при повторяемости 1 раз в 1000 лет</p> <p>2 – Зона с сейсмичностью 8 баллов при повторяемости землетрясений 1 раз в 500 лет и 8.5 баллов при повторяемости 1 раз в 1000 лет</p> <p>Место и номер экспериментальных исследований</p>	<div style="border: 1px solid black; background-color: #FFDAB9; padding: 5px; display: inline-block; margin-bottom: 10px;">8.5(9)</div> <div style="border: 1px solid black; background-color: #FF8C00; padding: 5px; display: inline-block; margin-bottom: 10px;">9(9*)</div>	<p>3 – Зона с сейсмичностью 8.5 баллов при повторяемости землетрясений 1 раз в 500 лет и 9 баллов при повторяемости 1 раз в 1000 лет</p> <p>4 – Зона с сейсмичностью 9 баллов при повторяемости землетрясений 1 раз в 500 лет и 9* баллов (более 9 баллов) при повторяемости 1 раз в 1000 лет</p>
---	---	--	---

Рис. 4. Карта-схема СМР для современной поверхности Имеретинской низменности с учетом результатов дополнительных детальных исследований и влияния техногенных факторов.

готовка основания вызывает перераспределение энергии сейсмических воздействий, поэтому необходимо проводить анализ спектральных характеристик при учете сейсмостойкости здания и установленного в нем оборудования. Расчетами было показано, что подготовка основания, выполненная грунтонабивными сваями (грунтовой подушкой) и методом химического закрепления, позволяет прогнозировать снижение балльности строительной площадки на 0.5–1.0 балла. Исследования [3, 4] по экспериментальной проверке степени улучшения сейсмических условий строительства под фундаментами зданий и сооруже-

ний, опирающихся на свайное основание, показали возможность понижения не только балльности строительной площадки, но и уровня сейсмических воздействий.

Устройство свайного основания является более технологичным и экономически оправданным методом улучшения сейсмических свойств грунтов оснований, чем цементация грунтов и их закрепление другими способами [2]. Примером проверки положений, изложенных в работах [3, 4], и дальнейших исследований по искусственному улучшению массива грунтов, созданного свайным полем железобетонных свай под фундамен-

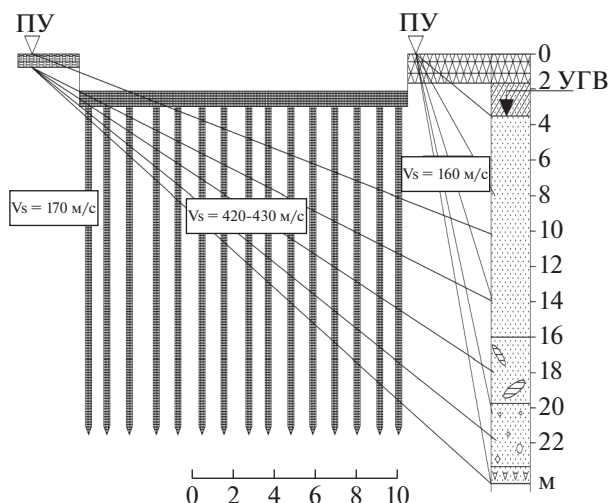
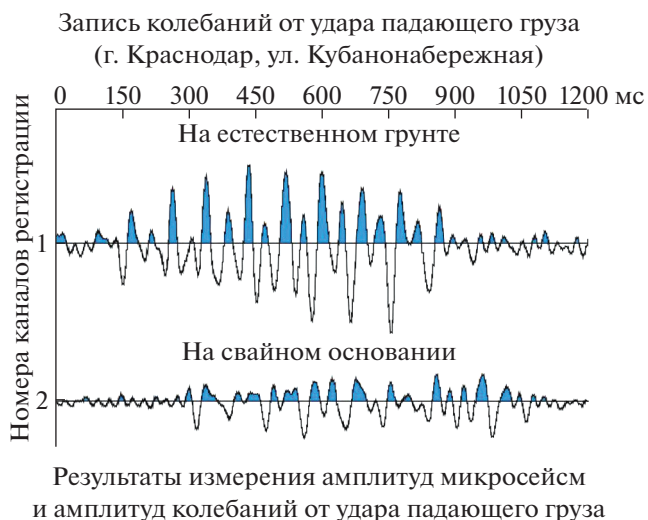


Рис. 5. Схема проведения исследований по сейсмическому просвечиванию под фундаментом строящегося здания и вертикальному сейсмическому профилированию (ВСП) в скважине, расположенной на естественном грунте между пунктом возбуждения колебаний (ПУ) на поверхности и сейсмоприемниками на зонде в скважине. В рамках – средние значения скоростей поперечных волн (V_s) по результатам исследований из [9].

том строящегося здания, могут служить результаты работ авторов на водонасыщенных песчаноглинистых грунтах III категории пойменных отложений р. Кубань (в г. Краснодар, ул. Кубанонабережная) [9]. Сейсмические характеристики искусственного массива изучались с применением вертикального сейсмического профилирования (метод ВСП) и просвечивания по наклонным лучам. Пойменные отложения представлены переслаиванием суглинков от мягкопластичных до текучепластичных и песками пылеватыми средней плотности. В естественном состоянии вне поля свай грунты характеризуются плотностью $\rho = 1.95 \text{ г/см}^3$, скорости S-волн изменяются от 120 в верхнем слое до 210–220 м/с на глубине 20–22 м. Средняя скорость S-волн по данным ВСП в этой толще – 150–170 м/с.

Искусственный массив создан полем свай размером в плане $28 \times 35 \text{ м}$. Железобетонные сваи размером $25 \times 25 \text{ мм}$ и длиной около 18 м располагались в шахматном порядке по сетке $1.5 \times 1.5 \text{ м}$. Схема наблюдений и результаты просвечивания массива, созданного полем свай, показаны на рис. 5.

Среднее значение V_s в пределах свайного поля оценивается в 420–430 м/с. Расчетная плотность с учетом объема железобетонных свай в искусственном основании составила 2.25 г/см^3 . Таким образом, сейсмическая жесткость в поперечных волнах в пределах поля свай увеличилась относительно жесткости естественных грунтов в 3 раза. По данным регистрации колебаний от ударов па-



Результаты измерения амплитуд микросейсм и амплитуд колебаний от удара падающего груза

Тип источника колебаний	Среднемаксимальная амплитуда, мм при записи колебаний		Расчет приращений интенсивности ΔI , балл	
	на поверхности естественного грунта \bar{A}_p	на фундаменте $\bar{A}_ф$	$\Delta I = 2 \lg \bar{A}_ф / \bar{A}_p$	$\Delta I = 3,3 \lg \bar{A}_ф / \bar{A}_p$
Микросейсм	17	9.1	-0.6	-
Колебания от удара падающего груза	18	11.1	-	-0.7

Рис. 6. Пример записи колебаний и результатов измерений амплитуд колебаний на фундаменте сооружения, опирающегося на сваи, по сравнению с амплитудами колебаний на поверхности естественного грунта от ударов падающего груза массой около 1 т с высоты 4 м.

дающего груза (массой около 1 т с высоты 4 м) и микросейсм, среднемаксимальные амплитуды колебаний на фундаменте, опирающемся на сваи, по сравнению с амплитудами колебаний на поверхности естественного грунта тоже уменьшились в 1.8–2 раза (рис. 6).

Такие же исследования по качественной оценке искусственного улучшения сейсмических условий для оснований сооружений на грунтах III категории были проведены на территории олимпийских объектов Имеретинской низменности. Для уточнения сейсмических условий площадки размещения Апарта-отеля категории 4 звезды на 200 номеров в г. Сочи после проведения инженерной подготовки площадки для строительства были выполнены комплексные инструментальные геофизические исследования. В искусственном массиве, созданном полем буронабивных свай диаметром 800–1000 мм и длиной более 20 м, расположенных в шахматном порядке на расстоянии друг от друга 1.5–2.0 м, в сравнении с естественными грунтами произошло увеличение скорости поперечных волн в 2.5–3 раза (до 630–800 м/с). Даже не принимая во внимание не-

Таблица 1. Изменение сейсмических условий на грунтах II–III и III категорий Имеретинской низменности после искусственного закрепления грунтов оснований устройством свайного фундамента

Название участка	№ экспериментальных исследований на картах СМР	Категория грунтов по сейсмическим свойствам	Год исследования	Сейсмоактивные зоны	На поверхности естественных грунтов			После улучшения грунтов основания A_{max}	
					T_{max} , с	τ , с	A_{max} , см/с ²	I $V_{scv} = 450$ м/с	II $V_{scv} = 700$ м/с
Имеретинская низменность	1	III	1985–1998	Ближкие	0.30	10	450	–	–
Имеретинская низменность (обобщенные)	6	III	2007	Сухумская	0.70	20	465	–	–
Апарт-отель	2	III (II–III)	2011 (2007)	Ближкие	0.29	10–11	380 (330)	275	265
Имеретинская низменность (обобщенные)	3	II–III	2007	Ближкие	0.29	9–11	295	225	220
Центральный олимпийский стадион (разжижение)	4	II–III (III–IV)	2011	Сухумская	0.70	20	285	250	245
Четырехзвездный гостиничный комплекс на 700 номеров	5	III (II–III)	2012 (2007)	Ближкие	0.28–0.29	10–11	380 (305)	285	275
								345	340
Основная олимпийская деревня (3000 мест). ОАО “Росстройлизскания” Зоны 1, 2	9 и 10	II–III	2010–2011	Акселеро-грамма, обобщенная из двух зон ВОЗ	–	25–27	260–290	–	–

T_{max} – период колебаний в максимальных пиковых ускорениях; τ – эффективная продолжительность колебаний; V_{scv} – скорости в массиве со свайным фундаментом; A_{max} , см/с² – рассчитанные максимальные (пиковые) значения ускорений, осредненные по компонентам X, Y, для периода повторяемости 1 раз в 1000 лет. В круглых скобках указаны категории грунтов и осредненные максимальные значения ускорений в год исследования.

сколько увеличенную плотность искусственного массива, в терминах сейсмического балла произошло снижение сейсмичности по крайней мере на 0.5 балла, определенной по МСЖ в соответствии с действующими нормативными документами, что следует отнести в запас относительно принимаемой сейсмичности. Кроме того, были продолжены эксперименты по измерению амплитуд колебаний на фундаменте строящегося сооружения, опирающегося на свайное поле, по сравнению с амплитудами колебаний на свободной поверхности грунта. Регистрировались колебания (импульсными источниками колебаний) от удара падающего груза массой около 700 кг с высоты 4 м. Расстояния между установленными на грунте и на фундаменте регистрирующими датчиками и импульсным источником колебаний были одинаковыми. Колебания от импульсных источников записывались при разной длительности. Соотношение между амплитудами колебаний на поверхности грунтовой толщи и опирающемся на сваи фундаменте в случае возбуждения колебаний от сбрасываемого груза оказались меньше, чем на поверхности естественного грунта в 1.5–2 раза. Таким образом, устройство свайного основания (с опорой свай на плотные слабо сжимаемые галечниковые грунты, кровля которых на глубине более 20 м) улучшило сейсмические условия строительства.

Наши и исследования других авторов показывают возможность понижения балльности строительной площадки и уровня сейсмических воздействий под фундаментами зданий и сооружений, опирающихся на свайное основание.

По результатам исследований была составлена таблица изменения сейсмических условий на грунтах II–III и III категорий для территории Имеретинской низменности после искусственного закрепления грунтов оснований устройством свайного фундамента (табл. 1).

Результаты предварительного расчета акселерограмм на типичных грунтовых комплексах, слагающих большую часть Имеретинской низменности, по программе “Расчет спектральных характеристик тонкослоистых сред”, разработанной в ИФЗ РАН [6–8], показывают тенденцию к уменьшению значений A_{max} и улучшению сейсмических свойств грунтов основания при создании в них свайных полей. Близкие результаты были получены при расчете по программе “NERA” [11]. Были рассмотрены два случая, когда искусственный массив со свайным фундаментом характеризуется средними значениями $V_s = 450$ м/с (случай I) и при $V_s = 700$ м/с (случай II) на глубину 30 м.

Рассмотренные выше результаты экспериментальных проверок изменения сейсмических усло-

вий под фундаментами зданий и сооружений в результате устройства искусственных оснований показывают, что эти изменения возможно прогнозировать. Прогнозная оценка сейсмических свойств грунтов после их улучшения методами инженерной подготовки может быть проведена с помощью соответствующего моделирования новых геосейсмических условий с последующим расчетом характеристик сейсмических воздействий по известным программам.

По данным выполненных опытных исследований по искусственному закреплению массива грунтов III категории (устройство свайного основания с опорой свай на плотные слабо сжимаемые галечниковые грунты) улучшило сейсмические условия строительства ориентировочно на 0.5 балла. При этом расчетные значения A_{max} могут уменьшаться на 20–30%. На таких “улучшенных грунтах” после предварительного проведения инженерной подготовки территории возможно дальнейшее строительство при освоении Имеретинской низменности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Для оценки изменения первоначальных сейсмических условий под влиянием техногенных факторов предлагается совместное использование расчетных методов с традиционными сейсмо-разведочными и инженерно-геологическими исследованиями.

2. Совместное применение эмпирических и расчетных методов значительно повышает обоснованность прогноза сейсмической опасности, выраженной в единицах сейсмической интенсивности либо в форме расчетных акселерограмм.

3. На примере современной территории Имеретинской низменности показано, как менялись сейсмические свойства и сейсмические условия на грунтах II–III и III категорий под действием техногенных факторов, начиная с 1990-х годов (начало исследований для СМР), после подготовки территории под будущее строительство (2007 г.) и начала строительства олимпийских сооружений и последующей их эксплуатации (2011–2014 гг.). Примером могут служить некоторые участки с грунтами II–III категории (2007 г.), которые по сейсмическим свойствам ухудшились и стали ближе к III категории через 4–5 лет после строительства олимпийских сооружений. Изменились также характеристики сейсмических воздействий: кривые динамичности, максимальные (пиковые) значения ускорений (A_{max}), преобладающий период колебаний в максимальных пиковых ускорениях (T_{max}). Следует также отметить, что при проведении крупномасштабных (более детальных) исследований могут меняться перво-

начальные представления о сейсмических свойствах грунтов.

4. Построена новая карта-схема СМР (по сравнению с картой 2007 г.) для современной поверхности Имеретинской низменности с учетом результатов детальных исследований и изменений сейсмических свойств грунтов под действием техногенных факторов – интенсивного строительства. Для разных участков на этой карте были предположительно оценены максимальные значения расчетных акселерограмм (A_{\max}).

5. Исследования показали, что новое строительство и реконструкция ранее построенных сооружений на территории Имеретинской низменности возможны только после предварительного проведения инженерной подготовки территории, заключающейся в выполнении интенсивного принудительного осушения и улучшения несущей способности илистых и песчано-глинистых грунтов оснований.

6. При проектировании и строительстве на грунтах III категории по сейсмическим свойствам для выяснения степени улучшения сейсмических условий относительно естественных после устройства искусственного основания, в том числе свайного, следует проводить специальные инженерно-сейсмологические исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Балабанов И.П., Гей Н.А. История развития Имеретинской лагуны в междуречье Мзымта-Псоу // Черноморский регион в условиях глобальных изменений климата: закономерности развития природной среды за последние 20 тыс. лет и прогноз на текущее столетие. М.: Географический ф-т МГУ, 2010. С. 25–41.
2. Голованов А.М., Пашков В.И., Рево Г.А. Опыт укрепления просадочных и насыпных грунтов оснований фундаментов зданий и сооружений цементацией // Сб. научных трудов. Ростов-на-Дону: ОАО Институт “Ростовский Промстройиниипроект”, 2004. С. 68–71.
3. Ильичев В.А., Курдюк А.Ю., Лиховцев В.М. Методика оценки влияния искусственного основания на интенсивность и спектральный состав сейсмических колебаний // Основания, фундаменты и механика грунтов. 1992. № 6. С. 28–30.
4. Миндель И.Г., Трифонов Б.А. Изменение сейсмических свойств грунтов в основании зданий и сооружений во времени, а также после их улучшения методами инженерной подготовки // Промышленное и гражданское строительство. 2003. № 10. С. 35–37.
5. Озмидов О.Р. Оценка риска сейсмического разжижения грунтов геологического основания объектов олимпийского строительства в г. Сочи // Вестник Российской академии естественных наук. Инженерная геология. 2014. № 1. С. 48–54.
6. Ратникова Л.И. Расчет колебаний на свободной поверхности и во внутренних точках горизонтально-слоистого поглощающего грунта // Сейсмическое микрорайонирование. М.: Наука, 1984. С. 116–121.
7. Ратникова Л.И. Метод расчета сейсмических волн в тонкослоистых средах. М.: Мир, 1973. 124 с.
8. Ратникова Л.И., Левшин А.Л. Расчет спектральных характеристик тонкослоистых сред // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1967. № 3. С. 41–53.
9. Севостьянов В.В., Миндель И.Г., Трифонов Б.А. Количественные характеристики сейсмических воздействий на ряде строительных объектов в г. Сочи по данным исследований последних лет // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2005. № 5. С. 71–74.
10. Уломов В.И. Вероятностно-детерминированная оценка сейсмических воздействий на основе карт ОСР-97 и сценарных землетрясений // Сейсмостойкое строительство. 2005. № 4. С. 60–69.
11. Bardet J.P., Tobita T. NERA: A Computer Program for Nonlinear Earthquake Site Response Analyses of Layered Soil Deposits. University of Southern California. Department of Civil Engineering. January 2001. 44 p.

MONITORING OF ENGINEERING GEOLOGICAL AND SEISMIC PROPERTIES OF SOILS DURING CONSTRUCTION AND OPERATION OF OLYMPIC FACILITIES (SOCHI, IMERETIAN LOWLAND)

B. A. Trifonov^{a,#}, S. Yu. Milanovskii^{a,b,##}, and V. V. Nesynov^a

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

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

[#] *E-mail: igelab@mail.ru*

^{##} *E-mail: svetmil@mail.ru*

We analyzed the results of experimental studies of temporal changes in seismic conditions for typical soil complexes unfavorable in engineering and geological terms on Imereti Lowland during the construction and operation of Olympic facilities. It is shown how seismic conditions have changed for soils (category II–III) under the influence of technogenic factors after the construction in 2011–2014 and subsequent operation of Olympic facilities. For this territory, a number of seismic microzoning (SMZ) maps was built with changing

seismic conditions depending on technogenic factors from 1986–1996 (start of work in the areas of future development in Sochi) till 2014–2021 (the end of construction and operation of the main Olympic facilities). According to our research results, the Imereti Lowland was classified as a territory with seismic intensity (I) more than 9 (category III) in 1986–1996. In the areas of expected Olympic facilities location (after engineering preparation of this territory for construction), the areas with soils of II–III categories with seismic intensity $I = 8.5$ and 9 with a frequency of 500 and 1000 years, respectively (for important structures) were mainly distinguished in the map of SMZ (2007). There are also some areas with primary soils (category III) with seismic intensity of 9 and more (9*). The studies in the territory of constructed and planned Olympic facilities have revealed the changes in the initial seismic properties in a number of areas with soils of category II–III. During 4–5 years, under the influence of technogenic factors on the soil massif, the seismic intensity increased by 0.5–0.7; and soils became closer to category III. In addition, the risk of possible seismic liquefaction of soils rose there. In our new SMZ map (for the years after 2014), more sections of III and II categories are outlined with seismic intensity of 9 (9*) and 8 (8.5), respectively, as compared to the map for 2007. To reduce the negative impact of technogenic factors and improve seismic conditions on the territory of the Imereti Lowland, it is proposed to create an artificially prepared foundation for the construction. On dynamically unstable soils, where subsidence may intensify, in order to improve properties of the foundation soils and to reduce the risk of seismic liquefaction, it is proposed to stabilize soils by creating an artificial pile foundation in addition to lowering of the water level. Examples are given of the artificial improvement of the soil massif created by piles foundations of buildings under construction. It is shown that the creation of a pile foundation for strengthening soil massif of category III reduces the maximum accelerations A_{\max} by 25–30% from the close zones of the origin of earthquake (ZOE), generating high-frequency earthquakes, and by 10–14% from remote Sukhumi ZOE zone, which generates low-frequency earthquakes.

Keywords: seismic microzoning, shear wave velocities, technogenic impacts, computational methods, accelerograms, artificial improvement of foundation soils

REFERENCES

- Balabanov, I.P., Gey, N.A. *Istoriya razvitiya Imeretinskoj laguny v mezhdurech'e Mzymta-Psou* [The history of the development of the Imeretian lagoon (Lowland) in the interfluvium of the Mzymta-Psou]. *Chernomorskii region v usloviyakh global'nykh izmenenii klimata: zakonmernosti razvitiya prirodnoi sredy za poslednie 20 tys. let i prognoz na tekusyhchee stoletie* [The Black Sea region under the global climate change: patterns of development of the natural environment over the past 20 thousand years and forecast for the current century]. Moscow, Geographic Faculty of the Moscow State University, 2010, pp. 25–41. (in Russian)
- Golovanov, A.M., Pashkov, V.I., Revo, G.A. *Opyt zakrepleniya prosadochnykh i nasypnykh gruntov osnovanii fundamentov zdaniy i sooruzhenii tsementatsiei* [Experience in cementation grouting of collapsible and fill soils in the basement of buildings and engineering structures]. Collection of scientific papers. Rostov-on-Don, Rostov PromStroyNiiProekt Publ., 2004, pp. 68–71. (in Russian)
- Il'ichev, V.A., Kurdyuk, A.Yu., Likhovtsev, V.M. *Metodika otsenki vliyaniya iskusstvennogo osnovaniya na intensivnost' i spektral'nyi sostav seismicheskikh kolebanii* [Procedure of evaluating the artificial foundation influence on the intensity and spectral composition of seismic vibrations]. *Osnovaniya, fundamenty, i mekhanika gruntov*, 1992, no. 6, pp. 28–30. (in Russian)
- Mindel, I.G., Trifonov, B.A. *Izmenenie seismicheskikh svoystv gruntov v osnovanii zdaniy i sooruzhenii vo vremeni, a takzhe posle ikh uluchsheniya metodami inzhenernoi podgotovki* [Changes of seismic properties of soils at the base of buildings and constructions in time, as well as after their improvement by engineering preparation methods]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*, 2003, no. 10, pp. 35–37. (in Russian)
- Ozmidov, O.R. *Otsenka riska seismicheskogo razhizheniya gruntov geologicheskogo osnovaniya ob'ektov olimpiiskogo stroitel'stva v g. Sochi* [Estimation of the risk of seismic liquefaction of soils in geological foundation under the Olympic engineering structures in Sochi]. *Vestnik RAEN. Inzhenernaya geologiya*, 2014, no. 1, pp. 48–54. (in Russian)
- Ratnikova, L.I. *Raschet kolebanii na svobodnoi poverkhnosti i vo vnutrennikh tochках gorizontally sloistogo pogloshchayushchego grunta* [Oscillation calculation on the free surface and in the internal points of a horizontally layered absorbing soil]. *Seismicheskoe mikroraiionirovanie* [Seismic microzoning]. Moscow, Nauka Publ., 1984, pp. 116–121. (in Russian)
- Ratnikova, L.I. *Metod rascheta seismicheskikh voln v tonkosloistnykh sredakh* [Method for calculating seismic waves in thin-layered media]. Moscow, Mir Publ., 1973, 124 p. (in Russian)
- Ratnikova, L.I., Levshin, A.L. *Raschet spektral'nykh kharakteristik tonkosloistnykh sred* [Calculation of spectral characteristics of thin-layered media]. *Izv. AN SSSR. Fizika Zemli*, 1967, no. 3, pp. 41–53. (in Russian)
- Sevostyanov, V.V., Mindel, I.G., Trifonov, B.A. *Kolichestvennye kharakteristiki seismicheskikh vozdeystvii na ryade srtoitel'nykh ob'ektov v g. Sochi po dannym issledovaniy poslednikh let* [Quantitative characteristics of seismic impacts on a number of construction facilities' in Sochi according to recent studie]. *Seismostoikeye stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenii*, 2005, no. 5, pp. 71–74. (in Russian)
- Ulomov, V.I. *Veroyatnostno-determinirovannaya otsenka sermicheskikh vozdeystvii na osnove kart OSR-97 i stsenarnykh zemletryasenii* [Probabilistic-deterministic assessment of seismic impacts based on OSR-97 maps and scenario earthquakes]. *Seismostoikeye stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenii*, 2005, no. 4, pp. 60–69. (in Russian)
- Bardet, J.P., Tobita, T. NERA: A computer program for nonlinear earthquake site response analyses of layered soil deposits. University of Southern California. Department of Civil Engineering, January 2001, 44 p.

ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ ПРИРОДНЫХ И ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 556.164

ЗОНЫ ВЛИЯНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СТОКА В СИСТЕМЕ ГОРОДСКОГО ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЯ (НА ПРИМЕРЕ ТЕРРИТОРИИ МОСКВЫ)

© 2022 г. Е. А. Карфидова^{1,*}, Г. И. Батрак¹, А. П. Сизов², М. Н. Комаревская¹,
С. Н. Полеводова¹

¹ Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН (ИГЭ РАН),
Уланский пер., 13, стр. 2, Москва, 101000 Россия

² Московский государственный университет геодезии и картографии (МИИГАиК),
Гороховский пер., 4, Москва, 105064 Россия

*E-mail: e.karfidova@yandex.ru

Поступила в редакцию 19.04.2022 г.

После доработки 05.05.2022 г.

Принята к публикации 16.05.2022 г.

В статье рассматривается формирование поверхностного стока в городской среде с учетом инженерно-геологических условий. Обоснована значимость учета поверхностного стока для городской системы природопользования. Реализован подход к выделению зон влияния поверхностного стока и оценки их влияния на городскую среду. Совместный анализ зон влияния поверхностного стока и Карты инженерно-геологического районирования территории города Москвы позволяет получить геоэкологические характеристики зон влияния и предложить метод оценки уязвимости объектов природопользования. Подробный анализ влияния поверхностного стока на элементы городской среды приведен на примере природных территорий и городских кладбищ. Зоны влияния поверхностного стока предлагается учитывать в разработке зон с особыми условиями использования территории в Едином государственном реестре недвижимости.

Ключевые слова: система городского природопользования, цифровая модель рельефа, модель поверхностного стока, зоны влияния поверхностного стока

DOI: 10.31857/S0869780922040026

ВВЕДЕНИЕ

В истории развития городов проблема поверхностного стока всегда занимала заметное место, что было обусловлено необходимостью решения комплекса задач: сбор воды, водоотведение, функционирование дренажных систем и городской канализации, очистка вод при их поступлении в поверхностные водоемы, соблюдение природоохранных, санитарно-гигиенических и строительных норм, инженерная защита территорий, обеспечение безопасности технических систем и жизнеобеспечения городского хозяйства. В исследованиях поверхностного стока на урбанизированных территориях, в первую очередь, рассматривается речная сеть в системе городского ландшафта, а также градостроительные методы сохранения природного комплекса и ландшафтно-зонирование, так как решение этих вопросов формирует облик и климат города [4, 9, 14, 24]. Наиболее значимые исследования относятся к городам, образованным вблизи рек или в местах их слияния. На протяжении истории развития городов реки подвергаются значительным транс-

формациям. На них устраиваются запруды и строятся дамбы, часть рек засыпается или канализируется, русла изменяются, появляются каменные набережные; земная поверхность в большей степени становится “запечатанной” асфальтом, а объемы формируемого городского стока могут значительно превышать сток на той же площади природной территории [6, 10, 18].

Представление об особенностях формирования поверхностного стока в городских условиях вполне сложилось к середине XX в. Учет природных факторов и процессов (атмосферные осадки, испарение, фильтрация, задержание влаги растениями) и антропогенных факторов, связанных с технической составляющей (плотная застройка со множеством границ для движения воды; преобразование покрытия земли, ведущее к изменению коэффициента стока; водопроводящие коммуникации, нарушенный тепловой режим почвы и т.д.) содержится в государственных докладах, например, “О состоянии окружающей среды г. Москвы”, а также в научных работах по гидрологии, климату и экологии городов [6, 15, 23].

Проведенный анализ исследований в рамках указанной проблемы показал, что наряду с развитием подходов к формированию безопасной среды обитания в городах, реализуемых в международных проектах [<http://unhabitat.org/>] и концепции SmartCity [3, 18, 21], а также решением задач обеспечения устойчивого развития города в системе территориального планирования [8, 16], значимость поверхностного стока в системе городского природопользования рассматривается необоснованно в меньшей степени. Доклады Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации и принятие национального плана мероприятий адаптации к изменениям климата [1, 5, 7] обуславливают особую актуальность разработки методов по оценке влияния поверхностного стока на окружающую среду города и возможного учета в системе городского природопользования. Система городского природопользования основывается на законах г. Москвы: системных¹, законов сохранения природного комплекса² и законов, направленных на эффективное использование технических систем³. В дополнение к правовым основам, службы городского хозяйства при выполнении своих функциональных обязанностей, как землепользователи, руководствуются нормативно-методическими документами и техническими нормами водоотвода, водосбора, функционирования дренажных систем и ливневой канализации. Над их деятельностью надзирают инспекции и специалисты Департамента природопользования и охраны окружающей среды г. Москвы⁴.

В решении проблем учета поверхностного стока в Москве необходимо использовать результаты геоэкологических исследований Института геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН (ИГЭ РАН) [2]. Комплект крупномасштабных геологических карт Москвы [11] широко используется в градостроительной деятельности, особенно востребована интегральная Карта инженерно-геологиче-

ского районирования [2, 12], которую целесообразно использовать и для системы городского природопользования в настоящем исследовании. В развитие геоэкологических исследований на основе использования данных дистанционного зондирования (радарной съемки) была построена модель поверхностного стока территории Москвы [22], и введено понятие “зоны влияния поверхностного стока” [19]. При проверке адекватности модели поверхностного стока используется исторический подход к анализу развития эрозионной сети города и ее трансформациям за более чем 850-летнюю историю Москвы (на территории города расположено более 140 рек и 400 прудов, большая часть которых расположена на руслах рек).

Целью исследования является разработка методов выделения и анализа зоны влияния поверхностного стока на городскую среду на основе учета сложности инженерно-геологических условий, пространственного распределения опасных геологических процессов, в том числе и в случае, когда поверхностный сток может выступать катализатором их возможной активизации.

Формализация факторов риска негативного влияния поверхностного стока позволяет определить основные реципиенты риска и разработать адаптационные меры для применения землепользователями в хозяйственной и природоохранной деятельности. При этом используются новые геоинформационные технологии, базирующиеся на имеющихся городских информационных ресурсах и разработке новых информационных ресурсов на единой цифровой платформе города [13].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В состав **исходной информации** входят:

1. Энциклопедии и словари: Горная энциклопедия, Геологический словарь, География. Современная иллюстрированная энциклопедия. Разночтения в понятиях и терминах мультидисциплинарной проблемы вынуждают обратиться к энциклопедиям и выработать сводные понятия.

2. Картографические материалы о современных и исторических данных речной сети, регламентирующие документы о природном комплексе⁵ и ландшафтном зонировании⁶ территории Москвы.

¹ “О комплексном природопользовании” от 2.03. 2005 г. № 9, “О защите населения и территорий города от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера” от 05.11.1997 № 46 и “Об экологическом мониторинге” от 20.10.2004 № 65.

² “О защите зеленых насаждений” от 05.05.1999 № 17, “О городских почвах” от 04.07.2007 № 31, “Об особо охраняемых природных территориях” от 26.09.2001 № 48.

³ “О мониторинге технического состояния жилых домов” от 07.04.2004 № 21, “Об охране и использовании недвижимых памятников истории и культуры” от 14.07.2000 № 26.

⁴ “Рекомендации по расчету систем сбора, отведения и очистки поверхностного стока с селитебных территорий, площадок предприятий и определению условий выпуска его в водные объекты. М.: ОАО “НИИ ВОДГЕО”, 89 с.; ГОСТ Р 22.1.12-2005 Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Структурированная система мониторинга и управления инженерными системами зданий и сооружений. М.: Стандартиформ, 2005.

⁵ Постановление Правительства Москвы от 26.10.2019 г. № 1577-ПП “Об объектах природного комплекса Центрального административного округа города Москвы”. URL: <https://docs.cntd.ru/document/563927789>.

⁶ Постановление Правительства Москвы от 18.08.98 № 629 “О перспективном строительном и ландшафтном зонировании территории города Москвы”. URL: <https://docs.cntd.ru/document/8316365?marker> (Утратило силу в связи с введением Градостроительного Кодекса города Москвы от 25 июня 2008 года № 28).

3. Цифровой картографический слой Единой картографической основы города в масштабе 1 : 10 000.

4. Карта инженерно-геологического районирования в составе комплекта крупномасштабных геологических карт территории Москвы (2010) в масштабе М 1:10 000 [2, 11, 12]. Разработанная таксономическая система имеет иерархическую структуру, включая на первом уровне структурно-геоморфологические мегамассивы с тенденцией: А – поднятия и Б – опускания; на втором уровне – 6 таксонов макромассивов: ледникового комплекса (таксоны I, II) и аллювиального комплекса, включающего надпойменные террасы (таксоны III, IV, V) и пойменные террасы (таксон VI) гидрографической сети на территории города. На карте отражены категория сложности инженерно-геологических условий и информация о распределении опасных геологических процессов (с кодами, им присвоенными).

5. Данные дистанционного зондирования международного исследовательского проекта по созданию цифровой модели высот на основе радиолокационной топографической миссии шаттла или Shuttle Radar Topography Mission – SRTM90v.4.1 с геопортала CGIAR-CSI (URL: <http://srtm.csi.cgiar.org/>).

6. Сведения о субъектах (организациях) природопользования Москвы, работающих на природных территориях: а) природного комплекса города, в границах озелененных территорий: различные парки (городские, природно-исторические, садовые, лесопарки, в том числе национальный парк), ландшафтные заказники, памятники природы и другие объекты; б) кладбища, средозащитный потенциал которых не уступает природным территориям⁷.

7. Сведения о субъектах (организациях) природопользования Москвы, работающих на территориях, занятых техническими системами, в том числе: здания (в первую очередь, многоквартирные жилые дома), объекты историко-культурного наследия, дороги, сооружения, дренажные системы и инженерные сооружения водосбора, водотока и канализации. В круг сведений о субъектах природопользования входят утверждающие положения и документы, регламентирующие содержание территории/технической системы в соответствии с функциональным назначением, градостроительным режимом и требованиями обеспечения безопасности.

⁷ СанПиН 2.1.2882-11 “Гигиенические требования к размещению, устройству и содержанию кладбищ, зданий и сооружений похоронного назначения”. URL: <https://rg.ru/2011/09/07/sanpin-dok.html>

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводится на программном обеспечении геоинформационных систем ArcGIS ESRI и GlobalMapper, включая расчетно-аналитические модули трехмерного моделирования (3DAnalysis), пространственного анализа (Spatial Analysis) и гидрологических исследований (Hydro modeling) ESRI.

Исследования поверхностного стока на основе цифровой модели рельефа и постановка задач зависят от источника топографических данных, и, следовательно, в реализации задач выбирается соответствующий масштаб, в нашем случае масштаб М 1:25000, широко используемый в планах застройки и системе городского природопользования. К принципиальным особенностям постановки задач относится соответствие концепции открытых данных, когда используются и разрабатываются открытые данные, доступные для субъектов природопользования.

Исследование выполняется в несколько последовательных этапов. На начальном этапе по доступным источникам уточняется терминология, используемая в исследованиях поверхностного стока городской территории, с этой целью составляется сводная таблица понятий и терминов: *сток, долина, овраг, ложбина, дельта, тальвег, водоток, дрена и др.*

1. При построении модели поверхностного стока на основе цифровой модели рельефа [22] рассчитываются ГРИДы (ГРИД – разработанный ESRI GRID формат хранения растровых данных) с размером ячейки 50 м: ГРИДы аккумуляции поверхностного стока и локально замкнутых понижений или депрессии с глубиной более 0.5 м [19], а также расчетные линейные направленные водотоки с параметрами величины аккумуляции в начальной и конечной точках.

2. Рассчитанные зоны аккумуляции поверхностного стока связываются с эрозионными врезами рек, сопоставляются с данными об истории и техногенной трансформации рек (запруживание, закапывание и организация дренажных систем, принимающих поверхностные воды, а также канализация).

Выделение последовательности максимальных значений аккумуляции позволяет определять *основные водотоки*, которые по тальвегу спускаются от вершины эрозионного вреза к устью реки. В целом расчетные водотоки образуют сеть поверхностного стока на городской территории.

3. Особое внимание уделяется зонам депрессий. Депрессии подразделяются на открытые (в основном, совпадающие с водоемами и природными территориями) и “запечатанные” (покрытые асфальтом). По полигональным объектам зон депрессий рассчитываются показатели площади и средней глубины. Оценки распределения де-

прессий определяются раздельно по берегам р. Москва с использованием технологии расчета расстояния между депрессиями. По контуру депрессий на основе цифровой модели рельефа через 50 м рассчитываются абсолютные высоты; особое внимание уделяется точке с минимальной высотой. Заметим, что в классической модели поверхностного стока зоны депрессий не учитываются в расчетах аккумуляции. Мы же предполагаем, что в некоторых случаях (при максимальных или длительных осадках) депрессии могут рассматриваться как дополнительный источник аккумуляции стока. В этом случае точка с минимальной высотой является началом водотока, связующего депрессию с сетью поверхностного стока.

4. Аккумуляция поверхностного стока распределяется на городской территории неравномерно; необходимость выявить зоны со значениями большей аккумуляции обуславливает расчет суммарной аккумуляции стока на единицу площади [19, с. 138]. Суммарные аккумуляции (SumFlacc) рассчитываются по методу ближайшего соседства на площади 1 км² (в радиусе 564 м). По этим значениям рассчитываются изолинии с пороговым значением площади существующего водосбора, в данном случае эмпирически заданным значением – 10000 ячеек; изолинии являются границами зоны влияния поверхностного стока. Пороговое значение суммарной аккумуляции поверхностного стока на территории Москвы принято как SumFlacc ≥ 25 км², и расчетные изолинии конвертируются в зоны влияния поверхностного стока. Заметим, что последние ограничивают эрозионные врезы и связываются с историческим протеканием рек, название зоны связывается с названиями существующих или исторических рек.

5. Существенным в постановке задач анализа зон влияния поверхностного стока (ЗВПС) является расчет типовых морфометрических характеристик эрозионных врезов⁸ (распределение абсолютных высот рельефа, гипсометрический индекс и глубина эрозионного вреза). В части анализа модели поверхностного стока определяются: оценки распределения аккумуляции стока и депрессий, а также графики роста аккумуляции по тальвегу и расчет коэффициента увеличения аккумуляции стока с учетом стока от депрессий.

6. Добавление ЗВПС к Карте инженерно-геологического районирования позволяет осуществить их совместное рассмотрение и наполнить содержание ЗВПС свойствами инженерно-геологических массивов. На совместной карте выделя-

ются категории сложности инженерно-геологических условий (ИГУ) и инженерно-геологические массивы с опасными процессами. Немаловажно использование иерархической системы районирования, позволяющей выделить таксоны по структурно-геодинамическому признаку. Особое внимание уделяется мегамассивам с тенденциями поднятия (А) и опускания (Б).

7. Анализ ЗВПС производится по основным компонентам инженерно-геологического районирования, включая распределение категории сложности инженерно-геологических условий и опасных геологических процессов. Для ЗВПС рассчитывается таксономическая формула геоэкологической опасности.

Таксономическая формула оценки геоэкологической опасности разработана в следующем виде [20]:

$$K1NP1, K2NP2, K3NP3 \dots,$$

где K1 > K2 > K3 – процент площади (целой части), занятой негативными геологическими процессами NP1, NP2, NP3... в порядке убывания. Коды опасных процессов приводятся в квадратных скобках, а коды процессов, занимающих площадь <1%, – в фигурных скобках. При этом используются коды процессов, принятые в Карте инженерно-геологического районирования территории Москвы [2].

8. Оценка уязвимости объектов природопользования (V) от совместного воздействия факторов поверхностного стока и ИГУ осуществляется по формуле:

$$V = F(A, C, H, GW, L), \quad (1)$$

где A – величина аккумуляции поверхностного стока (м²), C – категория сложности ИГУ, H – вид опасного геологического процесса, GW – уровень грунтовых вод (м), L – вид землепользования, определяющий коэффициент стока Kc [15].

Граничные значения показателей для оценки уязвимости объектов природопользования приводятся в табл. 1.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Пример сводной таблицы основополагающих понятий в рамках исследования поверхностного стока приводится в табл. 2.

Результат построения цифровой модели рельефа, расчета и анализа зон депрессий с ЗВПС на территории города представлен на рис. 1.

Распределение абсолютных высот в ЗВПС левых и правых притоков р. Москва представлены на рис. 2. Стандартное отклонение абсолютной высоты у правых притоков – 20.04 м, у левых – 12.50 м.

Исследование эрозионных врезов право- и левобережных притоков р. Москва показало, что

⁸ Geomorphometry – некоммерческая, неправительственная ассоциация исследователей и экспертов, открытая для свободного обмена знаниями и взглядами на различные аспекты работы с цифровой моделью рельефа. URL: <http://geomorphometry.org>.

Таблица 1. Граничные значения показателей для оценки уязвимости объектов природопользования в ЗВПС

Наименование показателя	Метод оценки	Ед. изм.	Значение показателя		
			мини-мальное	среднее	макси-мальное
<i>A</i> – величина аккумуляции поверхностного стока	Расчетно-аналитический	м ²			
<i>C</i> – категория сложности инженерно-геологических условий	По данным инженерно-геологического районирования	–	низкая	средняя	высокая
<i>H</i> – вид опасного геологического процесса	По данным инженерно-геологического районирования	–	Нет опасных процессов	Например, 1 – подтопление	Например, [1, 3]*
<i>GW</i> – уровень грунтовых вод	Данные мониторинга/ литературные данные [14]	м	1–3	3–5	Более 5
<i>L</i> – вид землепользования с коэффициентом стока	Данные мониторинга/ литературные данные [15]	–	0.2	0.5	Более 0.8

*Коды высокой категории сложности при сочетании двух опасных процессов (подтопление и карст-суффозия).

Таблица 2. Пример сводной таблицы понятия “долина”

Понятие *	Раскрытие понятия через пояснения и термины
<p>ДОЛИНА – отрицательная форма рельефа; узкое по сравнению со своей длиной и в большей части извилистое углубление в земной поверхности. Долины образуются размывающей деятельностью проточных вод (эрозией). Разновидности:</p> <p>ЛОЖБИНА – общее название для вытянутых денудационных форм с пологими, мягкими склонами.</p> <p>ДЕЛЛИ – ложбины стока, плоскостные, с <i>зачточными руслами</i>, чаще безрусловые, линейно вытянутые, иногда разветвляющиеся, служащие для стока дождевых и талых вод (плоскостного смыва).</p> <p>ОВРАГ – крутосклонная долина, часто сильно разветвленная, созданная деятельностью временного, редко небольшого постоянного потока на возвышенно-равнинных пространствах, особенно в области развития легко размывающихся рыхлых пород.</p>	<p>Различают <i>Д. главные и боковые</i>. В поперечном сечении <i>Д.</i> различают: <i>дно</i> и в его пределах <i>русло</i> – наиболее низкую часть дна, по которой течет постоянно или временно вода, и <i>пойму</i> – часть дна, заливаемую в половодье; <i>склоны</i>, иногда террасированные; <i>подожву склона</i> – место соприкосновения склонов и дна, <i>бровку</i> – место, где склон сочленяется с поверхностью другого генезиса или возраста.</p>

*Геологический словарь: в 2-х т. / Под ред. К.Н. Паффенгольца и др. М.: Недра, 1978. https://dic.academic.ru/dic.nsf/enc_geolog/17955.

их относительный гипсометрический индекс *HI* изменяется в пределах от 0.3 до 0.7, средние значения, одинаковые для ложбин левых и правых притоков – 0.48, стандартное отклонение 0.07. Глубины эрозионных врезов имеют разброс значений по левым притокам 5–33 м при максимальной абсолютной высоте от 140 до 183 м; по правым притокам – 12–43 м при максимальной абсолютной высоте от 178 до 245 м.

РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕПРЕССИЙ И ЗВПС НА ТЕРРИТОРИИ ГОРОДА

Мода распределения расстояний между депрессиями на территории составляет 301 м для

ЗВПС и 1291 м для депрессий вне ЗВПС, т.е. депрессии внутри ЗВПС встречаются чаще в 4 раза, чем за их пределами.

Сумма площадей депрессий на левобережье р. Москва – 36.2 км², а на правобережье – 26.2 км², т.е. на левобережье в 1.5 больше депрессий, чем на правобережье.

Характерное распределение относительной частоты суммарной аккумуляции поверхностного стока на площади 1 км² в ЗВПС и вне их относится к логнормальному закону распределения, и для сравнения оценок используется мода распределения.

Распределение относительной частоты суммарной величины аккумуляции поверхностного

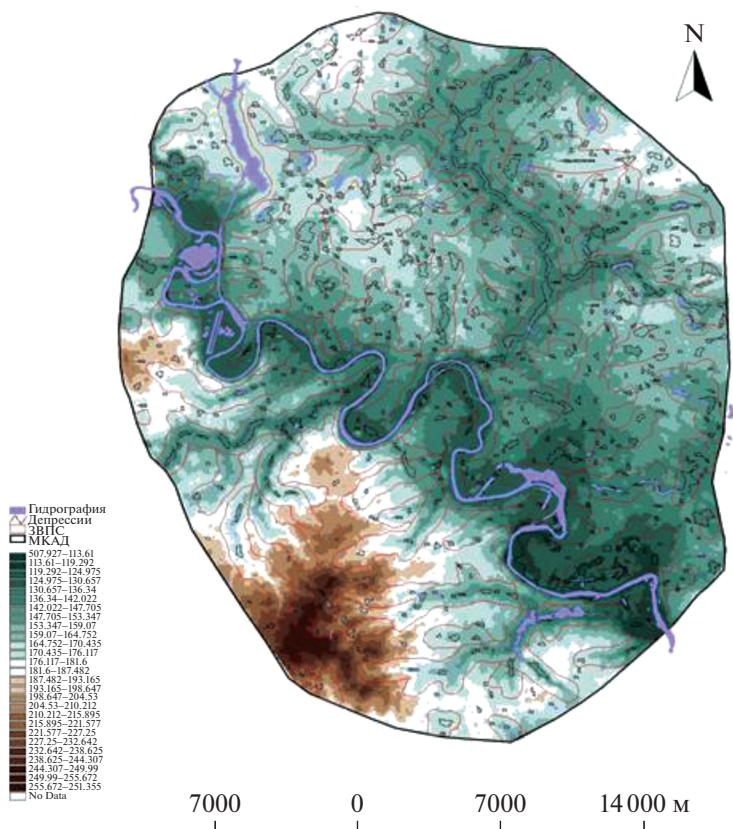


Рис. 1. Цифровая модель рельефа с зонами влияния поверхностного стока и депрессиями на территории Москвы внутри МКАД.

стока на площади 1 км² вне ЗВПС представлено на рис. 3.

В ЗВПС суммарная величина аккумуляции стоков в 5.5 раза больше, чем вне этих зон. В пределах мегамассива Б располагаются левые притоки р. Москва, в целом их площадь зон влияния в 4 раза больше, чем в мегамассиве А (рис. 4).

Важнейшей характеристикой эрозионного вреза является рост кумулятивной аккумуляции

стока по тальвегу. Для сравнения были выбраны эрозионные врезы наиболее протяженных рек по левобережью – р. Лихоборка, по правобережью – р. Городня. Диаграмма аккумуляции стока по тальвегам указанных рек представлена на рис. 5.

Можно заметить, что в начале тальвега рост аккумуляции стока меньше, чем в среднем по всей длине тальвега, средние коэффициенты ро-

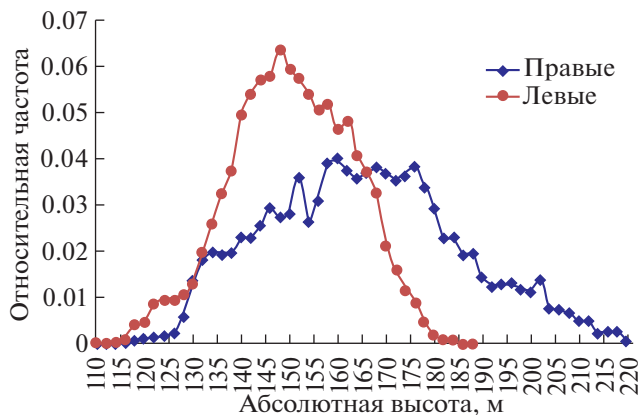


Рис. 2. Графики распределения абсолютных высот в ЗВПС левых и правых притоков р. Москва.



Рис. 3. Распределение относительной частоты суммарной величины аккумуляции поверхностного стока на площади 1 км² вне ЗВПС. Мода распределения – 3000 ячеек.

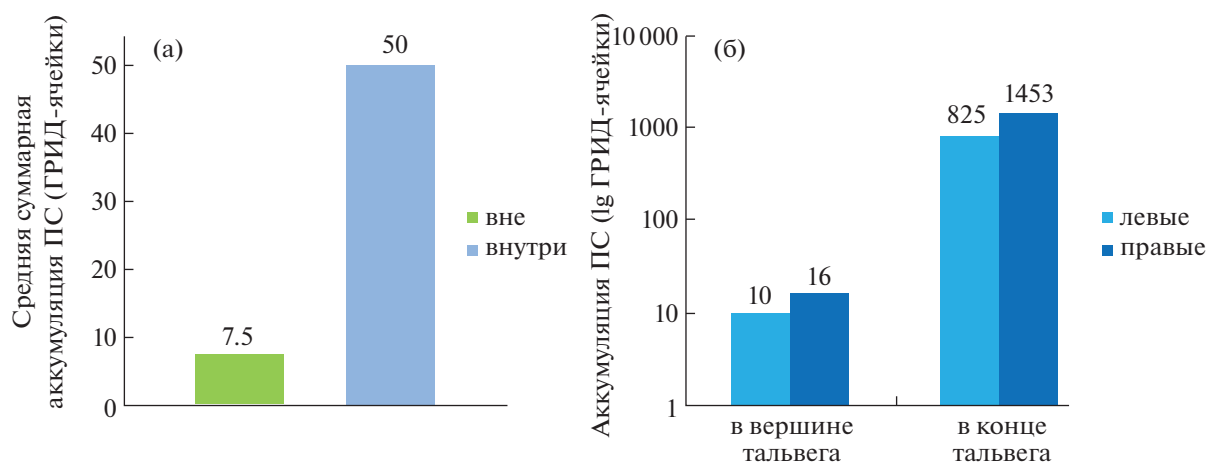


Рис. 4. Диаграммы сравнения аккумуляции поверхностного стока: а – по моде распределения суммарной аккумуляции на площади 1 км² вне и внутри ЗВПС; б – в зоне максимальной аккумуляции поверхностного стока в начале (вершине) и в конце тальвега эрозионных врезов по левым и правым притокам р. Москва.

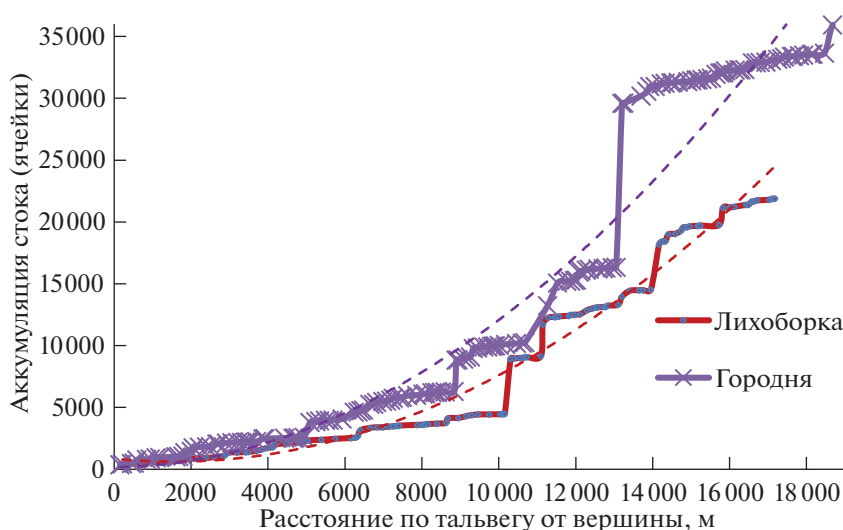


Рис. 5. Диаграмма аккумуляции стока по долинам рек Лихоборка и Городня от начала до конца тальвега. Пунктиром показаны расчетные линии тренда роста аккумуляции стока (полиномы второй степени) с коэффициентом детерминации $R > 0.95$.

ста аккумуляции по *правым* притокам составляют 1.5–1.7 (в начале) и 1.89 (в среднем по тальвегу), а по *левым* притокам 0.9–1.0 (в начале) и 1.25 (в среднем по тальвегу), т.е. рост аккумуляции по *правым* притокам в 1.44 раза больше, чем по *левым*.

Результатом наложения ЗВПС на базовую карту инженерно-геологического районирования является комплексная карта распределения ЗВПС по элементам инженерно-геологического районирования (рис. 6).

Геоэкологическая характеристика ЗВПС определяется в результате анализа категории сложности ИГУ и сочетания вида опасных процессов в их пределах. Результаты анализа распределения видов опасных процессов в ЗВПС приводятся на рис. 7.

Следует обратить внимание, что в ЗВПС левых притоков среди опасных процессов преобладает процесс подтопления, причем по площади его доля в 1.5 раза больше, чем в ЗВПС правых притоков. Спектр опасных процессов ЗВПС имеет гидрогеологическую природу (подтопление, подтопление + карст-суффозия, карст-суффозия).

Перечень геоэкологических показателей основных зон влияния поверхностного стока приводится в табл. 3.

Анализ комплекса таксономических формул ЗВПС показывает, что в пределах мегамассива Б преобладают ЗВПС с высокой категорией сложности инженерно-геологических условий, а в пределах мегамассива А – со средней.

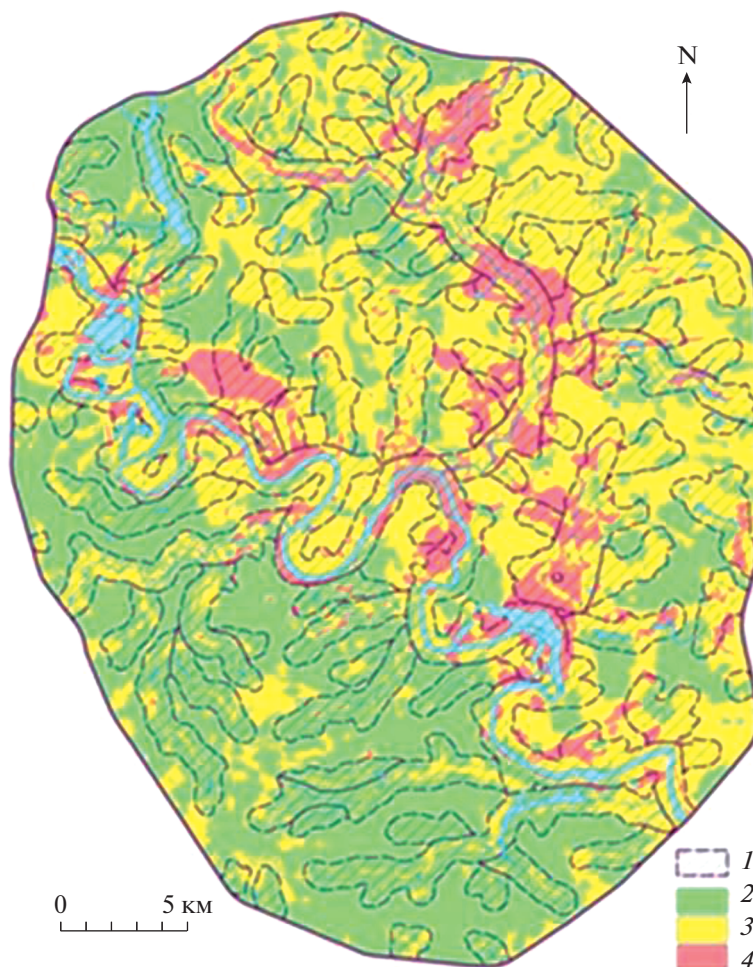


Рис. 6. Комплексная карта распределения ЗВПС по элементам инженерно-геологического районирования. 1 – зоны влияния поверхностного стока, 2, 3, 4 – категории сложности инженерно-геологических условий [2].

АНАЛИЗ ОТНОШЕНИЙ ЗВПС К ПРИРОДНЫМ ТЕРРИТОРИЯМ И КЛАДБИЩАМ

Анализ ЗВПС по основным объектам природопользования, которым необходимо представление о влиянии поверхностного стока и инженерно-геологическом районировании на территории города, осуществлялся по природным территориям и кладбищам. Основные задачи в ЗВПС этих объектов природопользования – мероприятия по водоотводу, наблюдение за состоянием дренажных систем и очистка территории от мусора для того, чтобы не допустить заболачивания и снижения средозащитного потенциала территории.

Анализ по отношению к ЗВПС кладбищ, как объектов с высокими экологическими и социальными рисками при затоплении, показал: 67% площади кладбищ находятся в ЗВПС. К высокой категории сложности инженерно-геологических условий с сочетанием распространения процессов подтопления и карст-суффозии на площади более 80% относятся кладбища: Богородское, Медведковское, Введенское, Раевское, Преображенское.

При рассмотрении расположения ЗВПС вдоль тальвега эрозионного вреза или кумулятивной аккумуляции поверхностного стока основное внимание должно сосредоточиться на оценках уязвимости технических систем водостока и канализации.

Дополнительными показателями уязвимости являются износ оборудования и наличие средств мониторинга объема поверхностного стока, особенно необходимое при экстремальных осадках (максимально разовых и длительных). В зарубежном опыте [3, 17–21] необходимо отметить широкое использование средств такого мониторинга в городских условиях; например, в работе [23] описывается успешный опыт использования средств мониторинга в кварталах городской планировки Германии. В Российской Федерации эти вопросы решаются в специальной информационной системе⁹ с использованием картографических материалов

⁹ ФЗ “О водоснабжении и водоотведении” от 28.01.2022 г. № 5 и ФЗ “О государственной информационной системе жилищно-коммунального хозяйства” (в редакции Распоряжения Правительства Российской Федерации от 18.10.2018 г. № 2253-р).

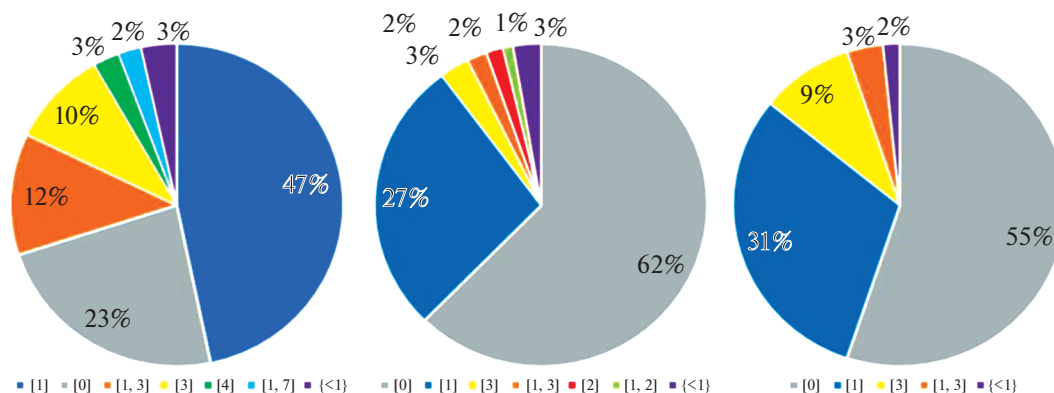


Рис. 7. Распределение опасных процессов в ЗВПС. В диаграммах используется удельный вес площадей опасных процессов внутри МКАД (слева-направо): левых притоков, правых притоков, на территории внутри МКАД вне ЗВПС. В квадратных скобках указаны коды опасных процессов, принятые в Карте инженерно-геологического районирования: 1 – подтопление, 2 – неглубокие оползни, 3 – потенциальная карст-суффозия, 4 – карст-суффозия, 5 – глубокие оползни, 6 – техногенные и 7 – слабые грунты, 0 – нет процессов.

детальной планировки города. Для субъектов природопользования принципиально важно наличие связи/электронного взаимодействия с этой информационной системой.

Примеры геоэкологической ситуации в зонах влияния поверхностного стока с учетом оценки инженерно-геологических условий приводятся на рис. 8.

Таблица 3. Примеры геоэкологических показателей ЗВПС на территории Москвы в пределах МКАД

Реки	Максимальное значение аккумуляции, ГРИД ячейки	Среднее значение роста аккумуляции, ГРИД ячейки/м*	Коэффициент увеличения максимальной аккумуляции над средним значением аккумуляции**	Таксономические формулы опасности
ЗВПС на территории мегамассива А (поднятия), правые притоки р. Москва				
Городня	36334	1.90	1453	63 [0] 35 [1] 1 [2] 1 { [6] [1, 2] }
Сетунь	26544	2.36	1062	49 [1] 37 [0] 3 [1, 6] 3 [1, 2] 2 [1, 3] 2 [6] 2 [2] 1 [1, 3, 6] 1 { [2, 6] [3] [3, 6] [2, 5] }
Раменка	17135	2.15	685	68 [0] 24 [1] 5 [2] 3 { [2, 6] [6] [1, 6] [1, 2] }
Чертановка	12665	1.05	507	73 [0] 24 [1] 2 [1, 2] 2 { [2] [6] }
Котловка	7399	0.86	296	85 [0] 9 [1] 3 [6] 1 [1, 2] 1 { [1, 6] }
ЗВПС на территории мегамассива В (опускания), левые притоки р. Москва				
Лихоборка	20867	1.19	835	42 [1] 32 [0] 22 [1, 3] 4 [3] 1 { [6] [1, 6] }
Нищенка	14049	0.88	562	36 [1, 3] 25 [3] 23 [1] 8 [0] 6 [3, 6] 2 [1, 3, 6] 1 { [6] [1, 3, 7] }
Серебрянка	11386	1.13	455	50 [1] 23 [0] 12 [1, 3] 11 [1, 7] 4 [3] 1 { [1, 3, 7] [1, 6] }
Сосенка	10025	0.80	401	78 [1] 11 [0] 4 [3] 4 [1, 3] 3 [1, 7] 2 { [1, 6] [1, 3, 7] [1, 6, 7] [7] }
Таракановка	9243	0.68	370	32 [1] 26 [0] 22 [4] 13 [3] 2 [4, 6] 2 [1, 4, 6] 1 [1, 3] 1 { [1, 4] [1, 3, 6] [6] [3, 7] }

* Среднее значение роста аккумуляции (ГРИД ячейки/м) – отношение суммарного прироста аккумуляции по тальвегу к длине водотока; ** Коэффициент увеличения максимальной аккумуляции над средним значением аккумуляции – отношение максимальной аккумуляции к средней величине аккумуляции в пределах ЗВПС. В таксономической формуле в квадратных скобках приводятся коды опасных процессов, в фигурных скобках – коды процессов, распространенных на менее 1% от общей площади.

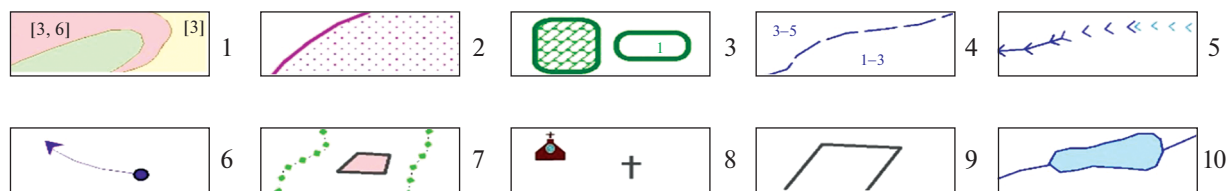
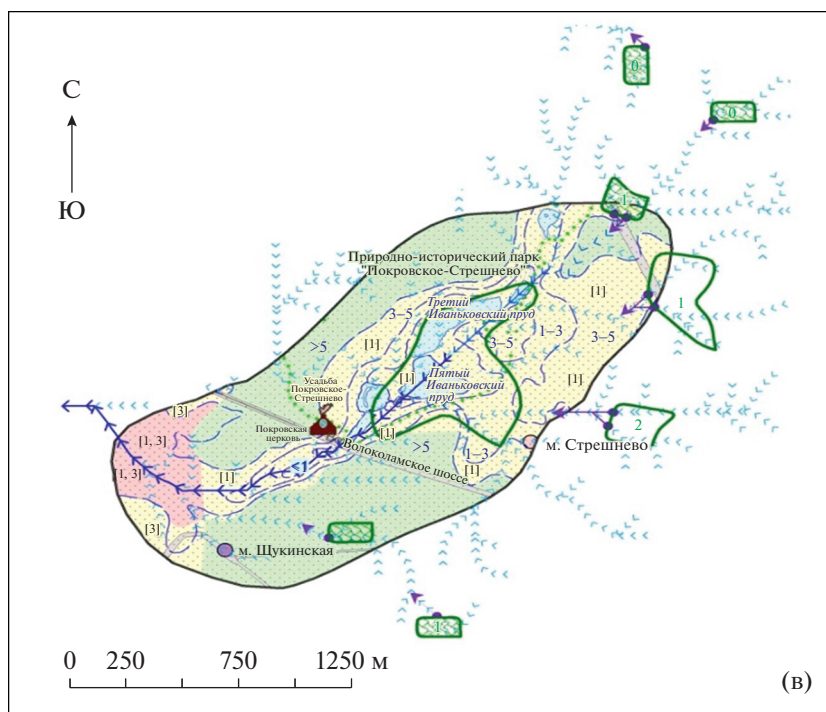
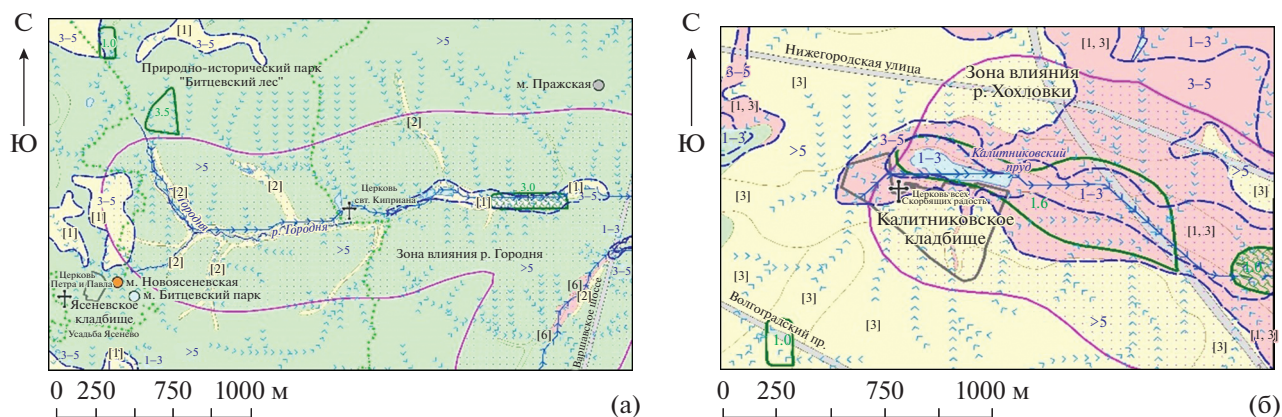


Рис. 8. Примеры геоэкологических ситуаций в зонах влияния поверхностного стока: а – ЗВПС р. Городня, б – ЗВПС р. Хохловка и в – ЗВПС р. Чернушки. 1 – Карта инженерно-геологического районирования с выделением категории сложности инженерно-геологических условий: зеленый цвет – низкая, желтый – средняя, сиреневый – высокая; 2 – зона влияния поверхностного стока; 3 – зоны депрессий: с заливкой – запечатанные, без заливки – открытые территории, цифры в центре – средняя глубина понижения; 4 – границы распространения грунтовых вод с различной глубиной залегания (м); 5 – линии расчетных водотоков с направлением движения: незначительные по величине аккумуляции < 400, значительные водотоки с величиной аккумуляции > 400 ячеек; 6 – точки выхода из депрессий; 7 – границы историко-культурных парков, усадьба; 8 – объекты историко-культурного значения (церкви); 9 – кладбища; 10 – гидрографическая сеть.

На карте-схеме (а) (см. рис. 8) рассматривается геоэкологическая ситуация с низкой категорией сложности ИГУ и отсутствием распространения опасных процессов в зоне влияния поверхност-

ного стока р. Городня на территории мегамассива А. Западная часть зоны относится к одному из самых крупных природно-исторических парков (Битцевский лесопарк) на территории Моск-

вы; в восточной части зоны по выходу стока из депрессии (со средней глубиной грунтовых вод 3 м) – средняя категория сложности ИГУ.

На карте-схеме (б) (см. рис. 8) представлена геоэкологическая ситуация с высокой категорией сложности ИГУ и распространением процессов подтопления и сочетания процессов подтопления с карстово-суффозионным процессом в зоне влияния поверхностного стока р. Хохловка на территории мегамассива Б. На территории зоны влияния находится историческое Калитниковское кладбище, к северу от кладбища – Калитниковский пруд, окруженный значительной по площади зоной депрессии со средней глубиной 1.6 м. На глубине эрозионного вреза реки глубина грунтовых вод 1–3 м, на территории кладбища при длительных атмосферных осадках необходимы частые обследования и готовность к организации работ по водоотводу, особое внимание следует уделять состоянию фундамента церкви (объекта историко-культурного наследия).

На карте-схеме (в) (см. рис. 8) представлен метод учета депрессий в сети поверхностного стока; геоэкологическая ситуация средней категории сложности ИГУ, в конце тальвега в зоне сочетания процесса подтопления с карстово-суффозионным процессом высокая категория сложности ИГУ на территории мегамассива Б с тенденцией опускания; с учетом зон депрессий коэффициент увеличения кумулятивной аккумуляции составляет существенное значение 1.3. В этом случае, так же как на схеме (б), в эрозионном врезе грунтовые воды находятся на глубине 1–3 м. На территории природно-исторического парка при длительных атмосферных осадках необходимы частые обследования дренажной системы, готовность к работам по водоотводу, особенное внимание следует уделять к состоянию фундаментов усадьбы и церкви – объектов историко-культурного наследия.

ВЫВОДЫ

Предлагаемые методы выделения и анализа зон влияния поверхностного стока позволяют определить взаимосвязи поверхностного стока и экзогенных геологических процессов на территории города и оценить уязвимость объектов природопользования.

Сравнение мегамассивов А (поднятия) и Б (опускания) позволяет отметить, что проявление экзогенных процессов и депрессий в большей степени присуще мегамассиву Б; это различие проявляется сильнее в ЗВПС. Таксономическая формула опасности ЗВПС дает представление о сложности инженерно-геологических условий и распределении видов опасных геологических процессов.

В зонах кумулятивной аккумуляции поверхностного стока при высокой категории сложности инженерно-геологических условий и наличии

опасных процессов (подтопление и карст-суффозия, подтопление и слабые грунты и пр.), при неглубоком уровне грунтовых вод (до 1 м) уязвимость объектов природопользования максимальна.

Рассмотренные примеры карт-схем оценки геоэкологической ситуации с позиции влияния поверхностного стока и оценки уязвимости объектов природопользования позволяют подойти к разработке необходимых первоочередных адаптационных мер по режиму функционирования городской инфраструктуры в зонах с особыми условиями использования территории.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алексеев Г.В. и др.* Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации Росгидромет. URL: http://downloads.igce.ru/publications/OD_2_2014/v2014/hm/1.htm
2. *Антипов А.В., Майоров С.Г., Осипов В.И., Галицкая И.В., Кутепов В.М. и др.* Инновационный проект по крупномасштабному специализированному геологическому картографированию территории г. Москвы // Инженерные изыскания для строительства: практика и опыт Мосгоргеотреста / Под ред. А.В. Антипова, В.И. Осипова. М.: ООО “Проспект”, 2012. С. 154–180.
3. *Бегич Я.Э., Шерстобитова П.А.* Концепция Smart-City как стратегия управления городской инфраструктурой // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2017. № 8. С. 27.
4. *Бегич Я.Э., Шерстобитова П.А., Морина Е.А., Макаров А.И.* Методы управления источниками поверхностного стока в странах Европы и возможность их применения в Санкт-Петербурге // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2018. № 2 (65). С. 59–76. [https://unistroy.spbstu.ru/userfiles/files/2018/2\(65\)/4_Begich_65.pdf](https://unistroy.spbstu.ru/userfiles/files/2018/2(65)/4_Begich_65.pdf)
5. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2020 год. http://www.meteorf.ru/upload/pdf_download/doklad_klimat2020.pdf
6. *Зверев В.П., Казеннов С.М.* Влияние урбанизации на гидрогеологические условия территорий // Геоэкология. 2003. № 2. С. 130–138.
7. *Золина О.Г., Булыгина О.Н.* Современная климатическая изменчивость характеристик экстремальных осадков в России // Фундаментальная и прикладная климатология. 2016. Т. 1. С. 84–103. <https://doi.org/10.21513/2410-8758-2016-1-84-103>
8. *Карфидова Е.А., Сизов А.П.* Оценка изученности условий городской территории для инженерно-геологического картографирования // Использование и охрана природных ресурсов в России. 2008. № 1. С. 65–72.
9. *Куприянов В.В.* Гидрология урбанизированных территорий // Некоторые вопросы современной научной и практической гидрологии. Ч. 1. М.: Изд. МГУ, 1981. С. 79–87.
10. *Мануйлов М.Б., Московкин В.М.* Влияние поверхностного стока (дождевых и талых вод) на экологическую и техногенную ситуацию в городах // Во-

- да и экология: проблемы и решения. 2016. № 2 (66). С. 35–47.
11. Миронов О.К. Геоинформационные технологии для составления крупномасштабных геологических карт территории Москвы // Геоэкология. 2011. № 3. С. 198–214.
 12. Миронов О.К. Концепция базы знаний в фондах геологической информации // Вестник Российской академии наук. 2017. Т. 87. № 1. С. 78–84. <https://doi.org/10.7868/S0869587316110086>
 13. Пространственные данные: потребности экономики в условиях цифровизации / [Кол. авт.: Е.Б. Белогурова, В.Е. Воробьев, О.Г. Гвоздев и др.]. URL: <https://www.hse.ru/data/2020/02/13/1573567778/doklad1.pdf> (in Russian)
 14. Темуор А.Н. Городская экология. М.: Академия, 2006. Т. 3. 336 с.
 15. Янин Е.П. Общие условия и основные факторы формирования водного стока в городских ландшафтах // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов. 2006. № 9. С. 73–111. <http://www.nparso.ru/images/docs/OS14.pdf>
 16. Bachurina S.S., Belyaev V.L., Karfidova E.A. Geocological Aspects of the Development of a Regional Model of Spatial Planning: Case Study of Moscow // Water Resources. 2017. V. 44. № 7. P. 971–979. <https://doi.org/10.1134/S0097807817070028>
 17. Chris Z., Cashman A., et al. Urban Flood Management, 2010, Taylor & Francis Group. <https://doi.org/10.1201/9781439894330>
 18. Jha A.K., Bloch R., Lamond J. et al. Cities and flooding: A guide to integrated urban flood risk management for the 21st century. The World Bank, GFDRR, 2012.
 19. Karfidova E., Batrak G. The research of surface runoff in engineering-geological zoning // Natural Hazards and Risk Research in Russia. V. Svalova (Ed.). Springer book. https://doi.org/10.1007/978-3-319-91833-4_9
 20. Karfidova E., Komarevskaya M., Kravchenko I., Polevodova S. Approaches to formalization of Assessment of territory Engineering geological complicity for purposes of sustainable urban Development // J. of Urban and Environmental Engineering (JUEE), 2020. V. 14. № 1. P. 132–143. <https://doi.org/10.4090/juee.2020.v14n1.132143>
 21. Martínez-Graña A., Goy J.L., Zaço C., Yenes M. Engineering Geology Maps for Planning and Management of Natural Parks: “Las Batuecas-Sierra de Francia” and “Quilamas” (Central Spanish System, Salamanca, Spain) // Geosciences. 2013. № 3. P. 46–62. <https://doi.org/10.3390/geosciences3010046>
 22. Osipov V., Karfidova E., Batrak G. The Drain Net Modeling On The Base Terrestrial And Radar Data. Comparative Analysis // 5th Annual Int. Conf. on Geological and Earth Sciences (GEOS 2016). https://doi.org/10.5176/2251-3353_GEOS16.35
 23. Riechel M., Matzinger A., Matthias P. et al. Sustainable Urban Drainage Systems in Established City Developments: Modelling the Potential for CSO Reduction and River Impact Mitigation // Journal of Environmental Management 2020 274:111207. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111207>
 24. Tshirintzis V.A., Hamid R. Modeling and management of urban stormwater runoff quality a review // Water Resources Management. 1997. V. 11. N. 2. P. 136–164. <https://doi.org/10.1023/A:1007903817943>

INFLUENCE OF SURFACE RUNOFF ZONES IN THE SYSTEM OF URBAN NATURE MANAGEMENT (BY THE EXAMPLE OF THE MOSCOW CITY)

E. A. Karfidova^{a, #}, G. I. Batrak^a, A. P. Sizov^b, M. N. Komarevskaya^a, and S. N. Polevodova^a

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

^b *Moscow State University for Geodesy and Cartography, Gorokhovskii per., 4, Moscow, 105064 Russia*

[#] *E-mail: e.karfidova@yandex.ru*

The paper considers surface runoff formation in urban environment taking into account engineering geological conditions. The significance of attention to surface runoff formation in urban nature management system is substantiated and the approach to identifying the zones of surface runoff influence on the urban environment is implemented. The joint analysis of surface runoff influence zones and engineering geological zoning maps of the Moscow city territory permits the authors to obtain geocological characteristics of the influence zones and to propose a method for assessing vulnerability of nature management objects. The detailed analysis of the surface runoff impact is given on the example of natural areas and urban cemeteries. It is proposed to take into account the surface runoff influence zones upon the development of zones with special use conditions in the state real estate cadastre.

Keywords: *system of urban nature management, digital elevation model, surface runoff model, zones of surface runoff influence, zones with special conditions for the territory use*

REFERENCES

1. Alekseev, G.V. et al. *Vtoroi otsenochnyi doklad Rosgidrometa ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiiskoi Federatsii* [The second assessment report of Roshydromet on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation]. URL: http://downloads.igce.ru/publications/OD_2_2014/v2014/htm/1.htm (in Russian)

2. Antipov, A.V., Mayorov, S.G., Osipov, V.I., Galitskaya, I.V., Kutepov, V.M. et al. *Innovatsionnyi proekt po krupnomasshtabnomu spetsializirovannomu geologicheskomu kartografirovaniyu territorii g. Moskvy* [Innovative project on large-scale specialized geological mapping of the territory of Moscow]. *Inzhenernye izyskaniya dlya stroitel'stva: praktika i opyt Mosgorgeotresta* [Engineering surveys for construction: practice and experience of Mosgorgeotrest]. A.V. Antipov, V.I. Osipov (Eds.), Moscow, OOO "Prospect" Publ., 2012, pp. 154–180. (in Russian)
3. Begich, Ya.E., Sherstobitova, P.A. *Kontsepsiya Smart-City kak strategiya upravleniya gorodskoi infrastrukturoi* [The concept of SmartCity as a strategy for managing urban infrastructure]. *Stroitel'stvo unikal'nykh zdanii i sooruzhenii*, 2017, no. 8, pp. 27. (in Russian)
4. Begich, Ya.E., Sherstobitova, P.A., Morina, E.A., Markarov, A.I. *Metody upravleniya istochnikami poverkhnostnogo stoka v stranakh Evropy i vozmozhnost' ikh primeneniya v Sankt-Peterburge* [Methods of managing surface runoff sources in European countries and the possibility of their application in St. Petersburg]. *Stroitel'stvo unikal'nykh zdanii i sooruzhenii*, 2018, no. 2(65), pp. 59–76. (in Russian)
5. *Doklad ob osobennostyakh klimata na territorii Rossiiskoi Federatsii za 2020 god* [Report on climate features in the territory of the Russian Federation]. URL: http://www.meteorf.ru/upload/pdf_download/doklad_klimat2020.pdf (in Russian)
6. Zverev, V.P., Kazennov, S.M. *Vliyaniye urbanizatsii na gidrogeologicheskie usloviya territorii* [The impact of urbanization on the hydrogeological conditions of territories]. *Geoekologiya*, 2003, no. 2, pp.130–138. (in Russian)
7. Zolina, O.G., Bulygina, O.N. *Sovremennaya klimaticheskaya izmenchivost' harakteristik ekstremal'nykh osadkov v Rossii* [Modern climatic variability of extreme precipitation characteristics in Russia]. *Fundamental'nyya i prikladnaya klimatologiya*, 2016, no. 1, pp. 84–103. Doi: 10.21513/2410-8758-2016-1-84-103 (in Russian)
8. Karfidova, E.A., Sizov, A.P. *Otsenka izuchennosti uslovii gorodskoi territorii dlya inzhenerno-geologicheskogo kartografirovaniya* [Evaluation study of the conditions of the urban area for engineering and geological mapping]. *Ispol'zovanie i okhrana prirodnnykh resursov v Rossii*, 2008, no. 1, pp. 65–72. (in Russian)
9. Kupriyanov, V.V. *Gidrologiya urbanizirovannykh territorii* [Hydrology of urbanized territories]. *Nekotorye voprosy sovremennoi nauchnoi i prakticheskoi gidrologii. Ch.1* [Some issues of modern scientific and practical hydrology. Part 1]. Moscow, MGU Publ., 1981, pp. 79–87. (in Russian)
10. Manuylov, M.B., Moskovkin, V.M. *Vliyaniye poverkhnostnogo stoka (dozhdevykh i talykh vod) na ekologicheskuyu i tekhnogennuyu situatsiyu v gorodakh* [The influence of surface runoff (rain and melt water) on the ecological and technogenic situation in cities]. *Voda i ekologiya: problemy i resheniya*, 2016, no. 2(66), pp. 35–47. (in Russian)
11. Mironov, O.K. *Geoinformatsionnye tekhnologii dlya sostavleniya krupnomasshtabnykh geologicheskikh kart territorii Moskvy* [Geoinformation technologies for compiling large-scale geological maps for the territory of Moscow]. *Geoekologiya*, 2011, no. 3, pp. 198–214. (in Russian)
12. Mironov, O.K. *Kontsepsiya bazy znaniy v fondakh geologicheskoi informatsii* [The concept of the knowledge base in the funds of geological information]. *Vestnik Rossiiskoi akademii nauk*, 2017, vol. 87, no. 1, pp. 78–84. (in Russian)
13. *Prostranstvennyye dannye: potrebnosti ekonomiki v usloviyakh tsifrovizatsii* [Spatial data: the needs of the economy in the context of digitalization]. E.B. Belogurova, V.E. Vorob'ev, O.G. Gvozdev et al. URL: <https://www.hse.ru/data/2020/02/13/1573567778/doklad1.pdf> (in Russian)
14. Tetior, A.N. *Gorodskaya ekologiya* [Urban ecology]. Moscow, Academy Publ., 2006, vol. 3, 336 p. (in Russian)
15. Yanin, E.P. *Obshchie usloviya i osnovnye faktory formirovaniya vodnogo stoka v gorodskikh landshaftakh* [General conditions and main factors for the formation of water runoff in urban landscapes]. *Problems of the environment and natural resources*, 2006, no. 9, pp. 73–111. URL: <http://www.nparso.ru/images/docs/OS14.pdf> (in Russian)
16. Bachurina, S.S., Belyaev, V.L., Karfidova, E.A. *Geological aspects of the development of regional model of spatial planning: case study of Moscow*. *Water Resources*, 2017, vol. 44, no. 7, pp. 971–979.
17. Chris, Z., Cashman, A., et al. *Urban flood management, 2010*, Taylor & Francis Group. URL: <https://doi.org/10.1201/9781439894330>
18. Jha, A.K., Bloch, R., Lamond, J. et al. *Cities and flooding: A guide to integrated urban flood risk management for the 21st century*. The World Bank, GFDRR, 2012.
19. Karfidova, E., Batrak, G. *The research of surface runoff in engineering-geological zoning*. In: *Natural Hazards and Risk Research in Russia*. V. Svalova, Ed., Springer book: 86943020. http://doi.org/10.1007/978-3-319-91833-4_9
20. Karfidova, E., Komarevskaya, M., Kravchenko, I., Polevodova, S. *Approaches to formalization of assessment of territory engineering geological complicity for purposes of sustainable urban development*. *Journal of Urban and Environmental Engineering*, 2020, vol. 14, no. 1, pp. 132–143. <http://doi.org/10.4090/juee.2020.v14n1.132143>
21. Martínez-Graña, A., Goy, J.L., Zazo, C. and Yenes, M. *Engineering geology maps for planning and management of natural parks: "Las Batuecas-Sierra de Francia" and "Quilamas" (Central Spanish System, Salamanca, Spain)*. *Geosciences*, 2013, no. 3, pp. 46–62. <http://doi.org/10.3390/geosciences3010046>
22. Osipov, V., Karfidova, E., Batrak, G. *The Drain net modeling on the base of terrestrial and radar data. Comparative analysis*. 5th Annual International Conference on Geological and Earth Sciences (GEOS 2016). http://doi.org/10.5176/2251-3353_GEOS16.35
23. Riechel, M., Matzinger, A., Matthias, P. et al. *Sustainable urban drainage systems in established city developments: modelling the potential for CSO reduction and river impact mitigation*. *Journal of Environmental Management*, 2020, vol. 274, no. 111207. <http://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020>.
24. Tsihrintzis, V.A., Hamid, R. *Modeling and management of urban storm water runoff quality a review*. *Water Resources Management*, 1997, vol. 11, no. 2, pp. 136–164.

ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

УДК 55:504. 75:550.348

ОЦЕНКА ГЛУБИННОГО И СКОРОСТНОГО СТРОЕНИЯ
ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ
СЕЙСМОЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА© 2022 г. М. Г. Попов^{1,*}, В. М. Макеев^{2,**}, О. Г. Попова¹¹ *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
Ленинские горы, 1, Москва, 119991 Россия*² *Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева Российской академии наук,
Уланский пер., 13, стр. 2, Москва, 101000 Россия*

*E-mail: mgpopov@list.ru

**E-mail: vmakeev@mail.ru

Поступила в редакцию 08.07.2022 г.

После доработки 15.07.2022 г.

Принята к публикации 20.07.2022 г.

В статье изложены результаты локального сейсмоэкологического мониторинга геологической среды предгорной области Кавказских Минеральных Вод и площадок Балаковской, Нижегородской и Кольской атомных электростанций, расположенных на Восточно-Европейской платформе. На основе PS-волн от далеких землетрясений эти объекты исследованы относительно геологического строения и современных геодинамических условий. Участки с аномальными показателями преломления этих волн впервые сопоставлены с активными зонами дислокаций. Для геологической среды Кавминвод и Балаковской АЭС по кинематике Р и PS-волн от далеких землетрясений созданы трехмерные модели глубинного и скоростного строения. В результате выявлены линейные высоко- и низкоскоростные контрастные структурные неоднородности, которые интерпретируются в качестве зон разломов и специфических сейсмогенных объемов. Разломы соответствуют зонам перехода от высокоскоростных к низкоскоростным границам распространения обменных волн. Сейсмогенные объемы являются высокоскоростными. Их образование связывается с активностью верхнемантийных интрузий (диапиров), подъем которых вызывает высокие упругие напряжения в слоях земной коры. Для геологической среды Нижегородской и Кольской АЭС построены трехмерные модели геодинамических показателей анизотропности γ и напряженного состояния S для разных временных интервалов. В результате определены аномалии этих показателей, выраженные резким увеличением или снижением иногда почти до нуля показателей анизотропности и напряженного состояния геологической среды. Причиной изменения этих показателей является подвижность (активность) зон тектонических дислокаций. В районе Нижегородской АЭС аномалии геодинамических показателей связываются с зоной растяжения, выраженной сбросовыми трещинами и суффозионно-карстовыми процессами. В районе Кольской АЭС на изменение значений геодинамических показателей повлияло далекое Индонезийское катастрофическое землетрясение с $M = 7.8$. Влияние выразилось негативными процессами в виде наведенной сейсмической активности. Это позволило сделать вывод о повышенной восприимчивости геологической среды района Кольской АЭС к внешним сильным землетрясениям и относительно удаленным техногенным взрывам, происходящим в шахтах и рудниках во время отработки месторождений. Исследования показали, что локальный сейсмоэкологический мониторинг эффективен для выявления, оценки и учета глубинных участков скоростной изменчивости геодинамических показателей, рассматриваемых в качестве сейсмогенных зон. Особенно мониторинг актуален для изучения геологической среды слабоактивных платформенных районов при проектировании особо опасных, технически сложных и уникальных объектов (атомных электростанций, ускорителей ядерных частиц, объектов захоронения РАО и др.) в связи с проблемами наведенной сейсмичности.

Ключевые слова: обменные волны, трехмерные модели, геодинамические показатели, анизотропность, напряженность, глубинные разломы, активные зоны, сейсмичность, геологическая среда, мониторинг, атомные станции

DOI: 10.31857/S086978092205006X

ВВЕДЕНИЕ

Сейсмический мониторинг – это “... *длительные непрерывные или циклические (периодические) наблюдения за изменениями сейсмических характеристик определенного участка геологической среды*” [1], которая, как правило, по вещественному составу, тектоническому строению и геодинамическим условиям формирования является неоднородной, изменчивой по трещиноватости и пористости и насыщенной гидротермальными флюидами. Сейсмические волны особенно от удаленных катастрофических землетрясений в такой среде преломляются неодинаково, что сформулировано в виде положений и принципов, которые широко используются для изучения глубинного и скоростного строения земной коры геофизическими методами. Сформулированные закономерности используются в методе обменных волн землетрясений (МОВЗ), в сейсмической томографии и др. методах изучения геологической среды [10, 19].

Принципы распространения волн использованы при разработке способа оценки напряженного состояния геологической среды с использованием сейсмических записей далеких землетрясений в “Стандарте организации¹...” [2, 18, 20–22]. В его основе лежит определение энергии обменных PS-волн, формализованное в виде геодинамических показателей анизотропности среды γ и интегрального показателя напряженного состояния S (γ , S – безразмерные величины). Показателем анизотропности γ не следует путать с показателем анизотропии [18].

Показатель γ определяется по отношению значений тангенциальной и радиальной энергии записи обменных PS-волн. С его помощью констатируется наличие в среде анизотропности в большей или в меньшей степени. Показатель S рассчитывается на основе оценки порогового уровня δ , превышение которого указывает на увеличение напряженного состояния среды ($\gamma > \delta$) [6, 12, 17].

Комплексный анализ показателей γ , S позволяет выявлять зоны (участки) вещественно-структурных неоднородностей или дислокаций, оценить их геодинамическую активность во времени и с глубиной, включая контроль их сейсмичности [13, 14]. Такой подход к оценке геологической среды был учтен при разработке локального сейсмо-экологического мониторинга (ЛСЭМ), актуального для территорий атомных станций. Мониторинг важен особенно для относительно низко активных равнинных регионов

¹ Стандарт организации. СТО 93.020-2013/5 “Способ оценки напряженного состояния геологической среды с использованием сейсмических записей далеких землетрясений” (<http://geoenv.ru/index.php/ru/info/innovations/innovatsii-i-standarty>).

при выборе безопасных мест проектирования и строительства особо опасных, технически сложных и уникальных объектов (ГЭС, АЭС и др.) в связи с опасностью наведенной сейсмичности. Помимо территорий АЭС мониторинг позволяет оценить распределение по площади и во времени микросейсмического фона геологической среды городских агломераций.

Цель ЛСЭМ – определение глубинного строения и напряженного состояния геологической среды для оценки геоэкологической безопасности территорий особо ответственных объектов, в том числе снижения риска образования опасных природных явлений и уменьшения потерь от их возникновения.

Для ЛСЭМ организуется полигон с пунктами наблюдений, состоящими из 3-компонентных цифровых сейсмостанций. Площадь полигона обычно составляет 40–60 км² [14]. Длительность наблюдения колеблется от 2 мес до 11 лет в зависимости от задач мониторинга и категории ответственности объекта. Отметим, что обменные PS-волны от далеких землетрясений позволяют изучать глубинные вещественно-структурные неоднородности непосредственно под пунктом наблюдения (п.н.), поскольку лучи, вдоль которых распространяются сейсмические колебания, в этом случае близки к вертикали [10]. По сейсмическим записям от техногенных взрывов, источник которых расположен недостаточно далеко от полигона, глубинное строение трудно оценить, поскольку не ясно, на каком участке среды от источника до приемника произошли изменения.

Цель настоящей статьи – выявление опасных на проявление сейсмической активности зон дислокаций в пределах разных по геологическому строению территории: предгорной сейсмогенной области Кавказских Минеральных Вод и платформенных районов расположения атомных электростанций (Балаковской, Нижегородской и Кольской), по результатам ЛСЭМ, который на этих объектах проводился в течение последних пятнадцати лет.

ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ОЦЕНКИ ИХ ГЛУБИННОГО И СКОРОСТНОГО СТРОЕНИЯ

Глубинное и скоростное строение геологической среды области Кавказских Минеральных Вод (Кавминводы) и района Балаковской АЭС, включая происхождение сейсмичности, исследованы по данным PS-волн от далеких землетрясений.

Область Кавминвод расположена на сочленении двух тектонических структур: предгорного Минераловодского поднятия на севере и горной

Лабино-Малкинской моноклинали на юге. Минераловодское поднятие выделяется по поверхности доюрского складчатого палеозойского фундамента, перекрытого чехлом мел-палеогеновых отложений. В современном рельефе к нему приурочены неогеновые горы-лакколиты с абс. отм. вершин более +1000 м. Лабино-Малкинская мезозойская моноклинали отвечает краевому (поперечному) поднятию Скифской плиты, вздернутому во время орогенеза с образованием Скалистого хребта Бол. Кавказа [5, 7].

Глубинное строение земной коры области Кавминвод (абс. отм.), представленное границами доюрского фундамента и Мохоровичича (М) (в абс. отм.), определено по временам запаздывания PS-волн относительно Р-волн [10] (рис. 1).

Граница доюрского фундамента в целом погружается с ЮЗ в СВ направлении с +1 км (гора Бештау) до -5 км (см. рис. 1а). В центральной части Кавминвод граница фундамента осложнена локальным изометричным опусканием с 0 до -2 км (п.н. JU1 и SOV), вокруг которого формируется сопряженное поднятие в виде отдельных возвышений. Такое строение характеризуется как циркумобразное, отвечающее радиально-концентрической структуре с центробежным типом развития.

Положение границы земной коры (М) также изменчиво по глубине (см. рис. 1б). В центральной части Кавминвод устанавливается относительно приподнятый выступ (-44 км), пересекаемый протяженной флексурой СЗ простирания. Она фрагментарно прослеживается по изолиниям -51 и -52 км за пределами рассматриваемой области. К северо-востоку от нее граница М в целом приподнята, к юго-западу — относительно опущена, что можно квалифицировать в качестве флексуры или флексурно-разломной зоны.

Границы доюрского фундамента и подошвы земной коры дискордантны относительно друг друга. Над выступом границы М в доюрском фундаменте выделяется опускание, а в рельефе, наоборот, — поднятие с неогеновыми горами-лакколитами (Бештау, Два Брата, Лохматая и др.). Такое строение предполагает наличие верхнемантийного диапира, вызывающего вертикальное сжатие земной коры [5]. Рост диапира вызывает отток глубинного вещества от центра выявленного опускания в стороны, что приводит к утолщению земной коры и формированию сопряженных возвышений. Под влиянием процессов перетока глубинного вещества формируется радиально-концентрическая структура, к которой приурочены гипабиссальные поднятия гор-лакколитов.

Скоростное строение земной коры определялось по временным задержкам Р-волн от регионального годографа с привлечением метода сейсмической томографии (рис. 2) [5, 19]. В верхней

части земной коры в интервале глубин 0–7 км выделяется резко контрастная высокоскоростная структура 5.4–5.6 км/с СЗ простирания (см. рис. 2а). Перепад высокоскоростных и низкоскоростных структур составляет 0.2–0.7 км/с. Корни этой структуры прослеживаются на глубину до 18 км, где она становится более отчетливой и протяженной. Скорость Р-волн здесь 5.7–5.9 км/с (см. рис. 2б). Согласно сейсмической томографии, на глубине 30 км, где распространена низкоскоростная кора (6.3 км/с), резко контрастная (аномальная) структура почти редуцирует (см. рис. 2в). Протяженность этой структуры не определена из-за ее простирания за пределы рассматриваемой территории, а ширина, устанавливаемая по ограничению низкоскоростными структурами, составляет от 20 до 30 км.

Анализ сейсмичности показал, что гипоцентры большинства землетрясений тяготеют к рассматриваемой протяженной аномальной структуре (Н = 7–18 км) и, особенно, к ее центральной части, где выделяется высокоскоростное ядро (5.9–6.1 км/с). Не исключается, что формирование ядра связано с внедрением верхнемантийного диапира, приводящим к объемной концентрации упругой энергии. Разрядка этой энергии выражается землетрясениями [3, 6]. Согласно представлениям А.Г. Гамбурцева и И.П. Добровольского, ядра такого типа обладают свойствами сейсмогенной коры [1, 3].

Очаги сильных землетрясений Галийского, Спитакского, Казанджигского, Дагестанского и др. сейсмоактивных районов также приурочены к крупным высокоскоростным объемам (ядрам) — накопителям упругой энергии [4, 11]. Особенно они тяготеют к градиентным зонам контрастных скоростей продольных волн, схожим с более меньшим по размеру кавминводским сейсмогенным объемом. Малые геометрические размеры этого объема, очевидно, отразились на более низком энергетическом классе сейсмических событий.

Район Балаковской АЭС (Бал АЭС) расположен в зоне сопряжения погребенной Волго-Уральской антеклизы и Прикаспийской синеклизы, перекрытых мезозой-кайнозойскими отложениями. Площадка АЭС находится на низком левобережье р. Волга на II надпойменной террасе. Ее долина согласуется со Средневожской геодинамически активной зоной, приуроченной к сочленению Приволжского субмеридионального и Каменно-Сыртского субширотного поднятий [8]. Несогласное сочленение по-разному простирающихся структур вызывает в активной зоне концентрацию левосдвиговых напряжений и сейсмичность.

Глубинное строение земной коры характеризуется деформациями, выраженными в поверхности докембрийского кристаллического фунда-

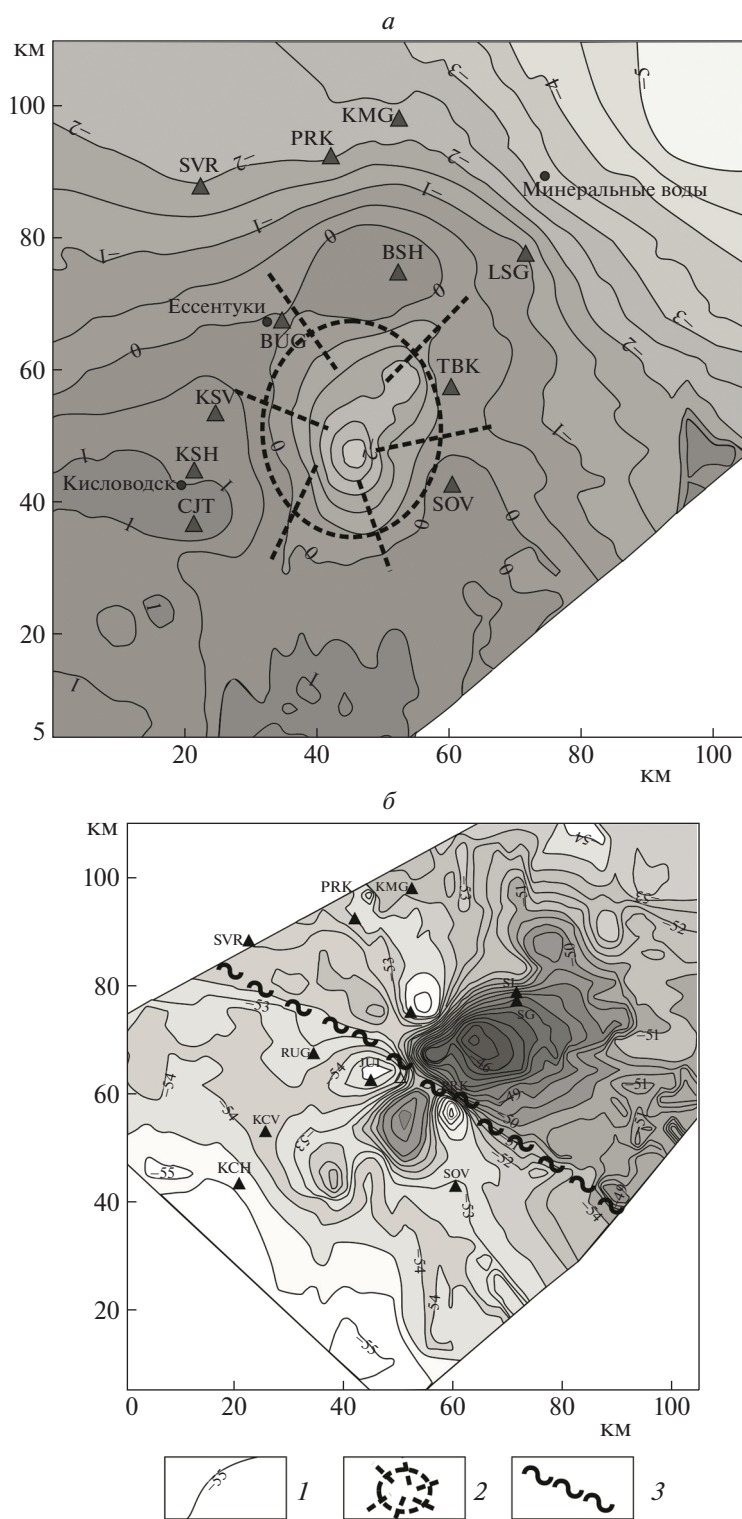


Рис. 1. Глубинное строение области Кавминвод: *а* – граница палеозойского доюрского фундамента (сечение горизонталей через 0.5 км), *б* – граница Мохоровичича (М) как подошва земной коры (сечение горизонталей через 1.0 км). 1 – изолинии глубин (км), 2 – радиально-концентрическая структура, 3 – флексурно-разломная зона. Треугольниками показаны пункты сейсмостанций (BSH, KCN, KMG и другие, обозначенные прописными латинскими буквами). Пункт BSH расположен на горе Бештау высотой +1401 м.

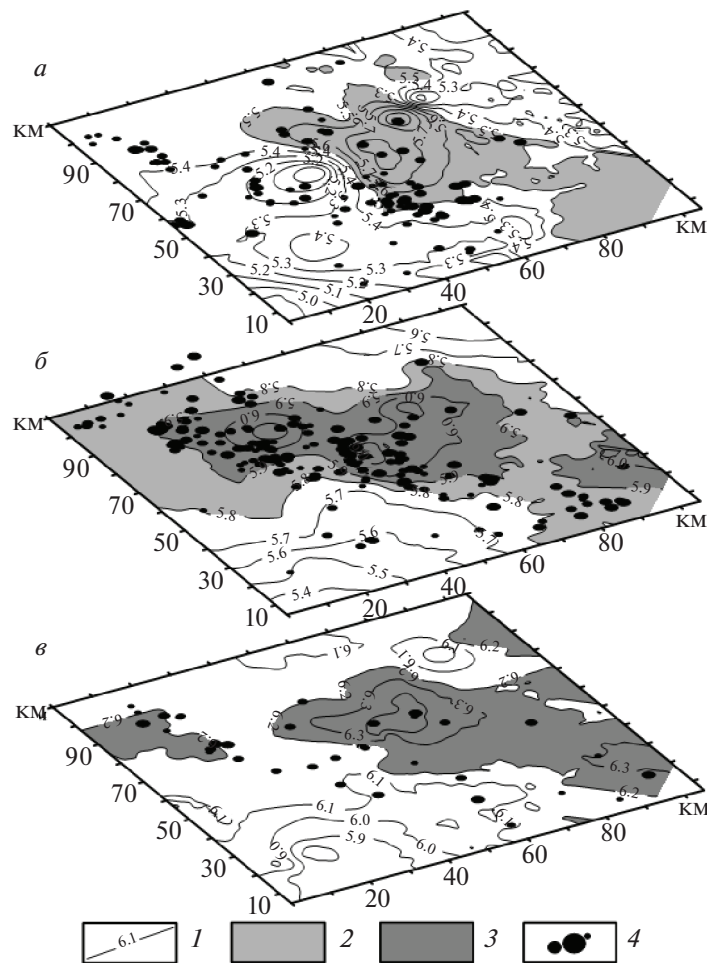


Рис. 2. Трехмерная скоростная модель геологической среды Кавминвод. Интервалы глубин (Н, км): а – 0–7; б – 7–18; в – 18–30. 1 – изолинии скорости обменных Р-волн в км/с (сечение изолиний через 0.2 км/с). Структурные аномалии: 2 – низкоскоростная 3 – высокоскоростная со свойствами сейсмогенной коры, 4 – эпицентры землетрясений.

мента (граница Φ) и подошвы земной коры (граница М) (рис. 3).

Положение границы Φ изменчиво по латерали. В восточной части рассматриваемого района она приподнята до отметок 1.6 км, а в северо-западной части опущена до глубин более 3.0 км (см. рис. 3а). В южной части граница этих структурных форм выражена отчетливой структурной ступенью (п.н. 8 и 10), которая по простиранию в северном направлении на границе поднятия и понижения редуцирует, возможно, по причине влияния разлома северо-восточного простирания. Его наличие подтверждается прерывистостью геологических границ в верхнекоревом слое. В северо-западной части разлом приурочен к границе ступени и поднятия, что, возможно, указывает на его сбросовый тип развития (п.н. 4 и 5).

Граница М также неоднородна (см. рис. 3б). В юго-восточной части она приподнята до 33.0 км, а в северо-западной части опущена более чем до

35.0 км. Сопряжение этих структурных форм выражено в виде зоны СВ простирания, которая согласуется с разломом кристаллического фундамента и со Средневожской активной зоной левосдвиговых напряжений [8].

Разноглубинные деформации границ М и Φ не скоординированы между собой. Поднятие границы Φ как бы повернуто против часовой стрелки относительно более глубинного поднятия границы М. Движение по типу послыоного вращения, возможно, привело к образованию в тылу поднятия границы Φ структурной ступени и разлома сбросового типа, согласного со Средневожской активной зоной. В ней устанавливаются непротиворечивые с типом вращения левосдвиговые напряжения и деформации, т.е. так же против часовой стрелки.

Скоростное строение земной коры района Балаковской АЭС выявлено до глубины 45 км на основе распределения скоростей Р-волн (км/с). По

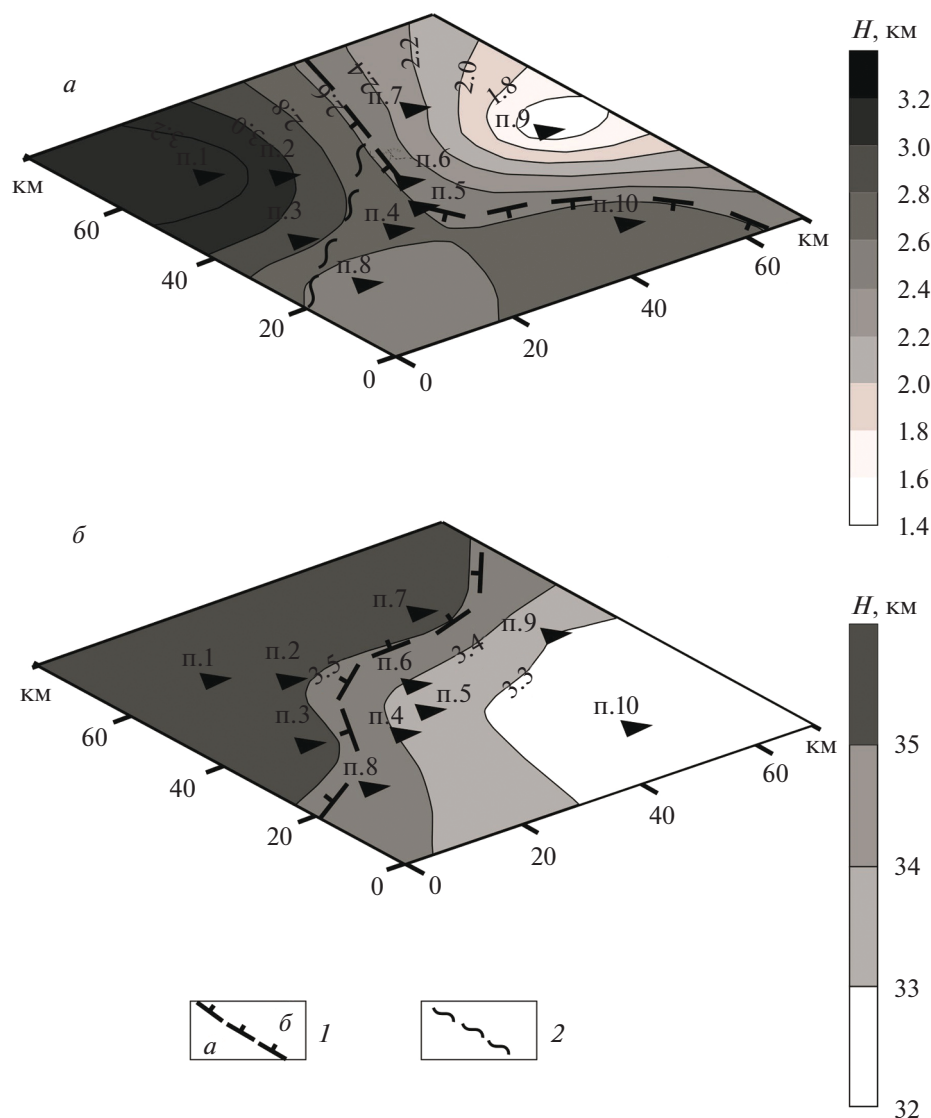


Рис. 3. Строение глубинных границ района Балаковской АЭС: *а* – граница поверхности докембрийского кристаллического фундамента Φ (сечение горизонталей через 0.2 км), *б* – граница Мохоровичича (М), сечение горизонталей через 1.0 км. Структурные формы: 1 – поднятие (*а*) и опускание (*б*); 2 – разлом в кристаллическом фундаменте. Треугольники – пункты сейсмостанций (п.1, п.3 и т.д.).

распределению волн выделяется два интервала глубин: 0–25 км и 25–45 км.

На глубине 0–25 км по незначительному перепаду скоростей 0.2–0.3 км/с установлена низко контрастная широтная структура. Относительно высокие скорости более 7.0 км/с устанавливаются в ее центральной части (рис. 4). Однако низко контрастный перепад скоростей от центральной части структуры к ее периферии не позволяет относить ее к категории сейсмогенных. Структура особенно отчетливо выражена на глубинах 5–15 км и менее 15–25 км. Западная ее часть совпадает с разломом, выявленным в кристаллическом фундаменте Φ (см. рис. 3а).

На глубине 25–45 км широтная структура меняет свое простирание на северо-восточное (диагональное). На этой глубине по характерному рисунку изолиний устанавливается протяженная субмеридиональная структура высокоградиентного изменения скоростей, которая может отвечать разломной зоне. Диагональная и субмеридиональная структуры пересекаются и создают своеобразный структурный узел, в котором возможна концентрация напряжений (см. рис. 4з), что вызывает необходимость оценки его активности, в том числе методом мониторинга геодинамических показателей (γ , S). Геодинамическая опасность узла усугубляется тем, что сейсмичность в нем может быть наведена от землетрясе-

ний, которые периодически случаются в Средне-Уральской и Северо-Кавказской сейсмоактивных областях [9].

РЕЗУЛЬТАТЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

Для районов расположения атомных станций, функционирование которых не всегда безопасно относительно современной активности геологической среды, проведены исследования геодинамических показателей (γ , S) с построением трехмерных моделей. Показатели анизотропности γ и напряженного состояния S получены для разных диапазонов глубин и временных интервалов, что позволило выявить зоны наиболее контрастных их изменений. В основу этой оценки положена авторская методика “Способ оценки напряженного состояния геологической среды с использованием сейсмических записей ...” [15, 16].

Трехмерные модели геодинамических показателей были построены для разных площадок АЭС, расположенных в разных районах Восточно-Европейской платформы: Нижегородской АЭС (Ниж АЭС), проектирование которой временно приостановлено по причине карстово-суффозионной опасности, и Кольской АЭС (Кол АЭС).

Район Ниж АЭС расположен в северо-западной части склона Токмовского докембрийского свода на высоком правобережье р. Ока. Кристаллический фундамент свода перекрыт девонско-пермским осадочным чехлом мощностью 1.1–1.5 км. Свод подвигается воздействием напряжений растяжения, наведенных с запада со стороны Окско-Донского активного прогиба, и сжатия, наведенного с юга со стороны одной из вершин Токмовского свода [8]. Интерференция разнотипных напряжений вызвала образование геодинамически активных зон разного ранга. Одна из них протяженная и наследуется долиной р. Ока, другая – менее протяженная локальная, согласуется с переуглубленным эоплейстоценовым врезом руч. Монаковский.

Для района Ниж АЭС созданы объемные модели анизотропности γ и напряженного состояния S на основе двух интервалов наблюдения: 17.01.2011–10.03.2011 г. и 11.03.2011–05.04.2011 г., и пяти глубинных уровней (Н, км): 0–1.45; 1.45–7.0; 7.0–13.5; 13.5–18.0 и 18.0–31 км (рис. 5).

Повышенная анизотропность с $\gamma > 0.6$ выделена на первом этапе наблюдений в северо-восточной части рассматриваемого района на глубине 13.5–31.0 км. На этой же глубине на втором этапе мониторинга отмечено резкое понижение показателя до почти нулевых значений 0–0.2. При этом локализация остается почти неизменной, что может указывать на наличие в этой части района тектонически подвижной зоны. В современ-

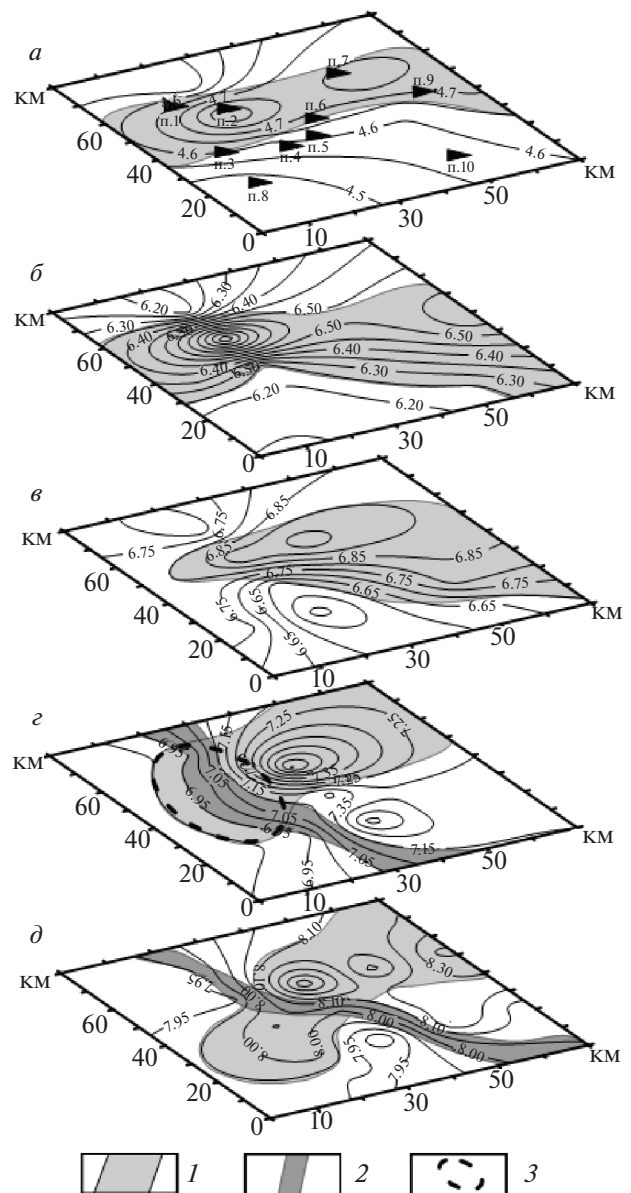


Рис. 4. Скоростная модель строения земной коры района Балаковской АЭС. Интервалы глубин (Н, км): а – 0–5, б – 5–15, в – 15–25, г – 25–35, д – 35–45. Структурные аномалии (зоны дислокаций): 1 – низкоскоростная, 2 – высокоградиентная; 3 – структурный узел пересечения низкоскоростной и высокоградиентной структур. Изолиниями показаны скорости Р-волн (км/с). Треугольники – пункты сейсмостанций.

ном рельефе с ней согласуется Монаковская подвижная (активная) зона. Согласно буровым данным, в этой зоне отмечаются повышенная трещиноватость сбросового типа и гидротермальная активность, которые вызывают интенсивные суффозионно-карстовые процессы в карбонатно-сульфатных пермских отложениях. Эти процессы отчетливо выражены в рельефе в виде воронок.

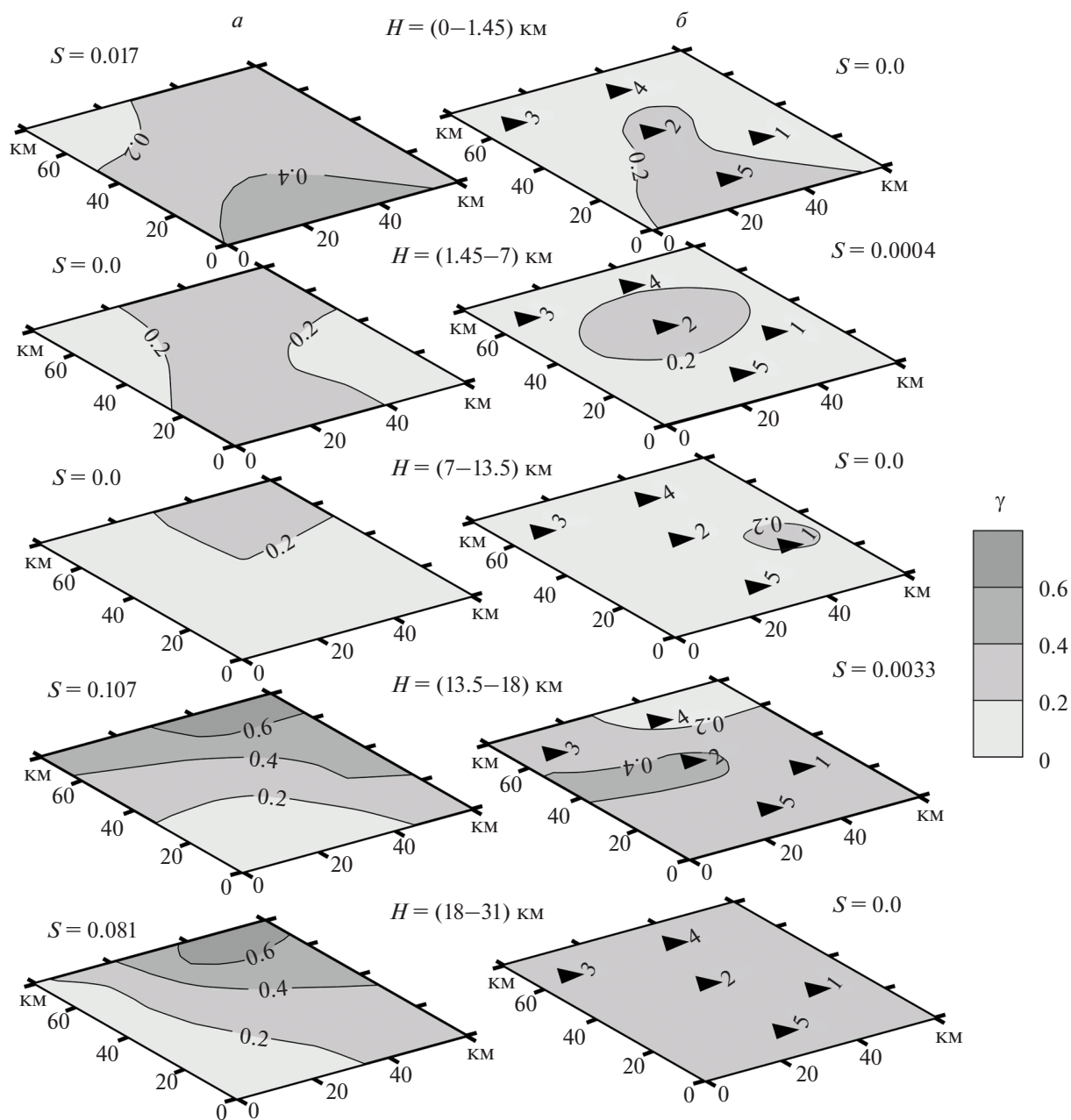


Рис. 5. Трехмерные модели распределения геодинамических показателей района Нижегородской АЭС. Этапы наблюдений: *a* – 17.01.2011–10.03.2011 г., *б* – 11.03.2011–05.04.2011 г. Геодинамические показатели: γ – анизотропность (показана в виде горизонталей с сечением через 0.2), S – напряженное состояние. H – интервал глубин. Треугольники с цифрами – пункты сейсмостанций.

Напряженное состояние S на 1-м этапе наблюдений в целом выше, чем на 2-м. До глубины 13.5 км отмечается постепенное увеличение значений S с 0.017 до 0.107 соответственно, а на глубине 13.5–18.0 км происходит резкое уменьшение S до нуля. Изменение этого показателя, особенно его спад приурочен к Монаковской активной зоне и, возможно, вызван ее активностью. В самой зоне помимо наличия в известняках зон трещиноватости, заполненных кальцитом и гипсом, отмеча-

ются следы миграции углеводородов и повышенные значения emanаций радона.

Район Кол АЭС расположен на северном побережье губы Кунчаст (оз. Экостровская Имандра) на тектоническом выступе (блоке), сложенном архейскими гранито-гнейсами, гнейсами и биотитовыми гнейсами беломорской серии.

Сейсмозоологический мониторинг был проведен в три этапа: 26.10.2015–11.12.2015;

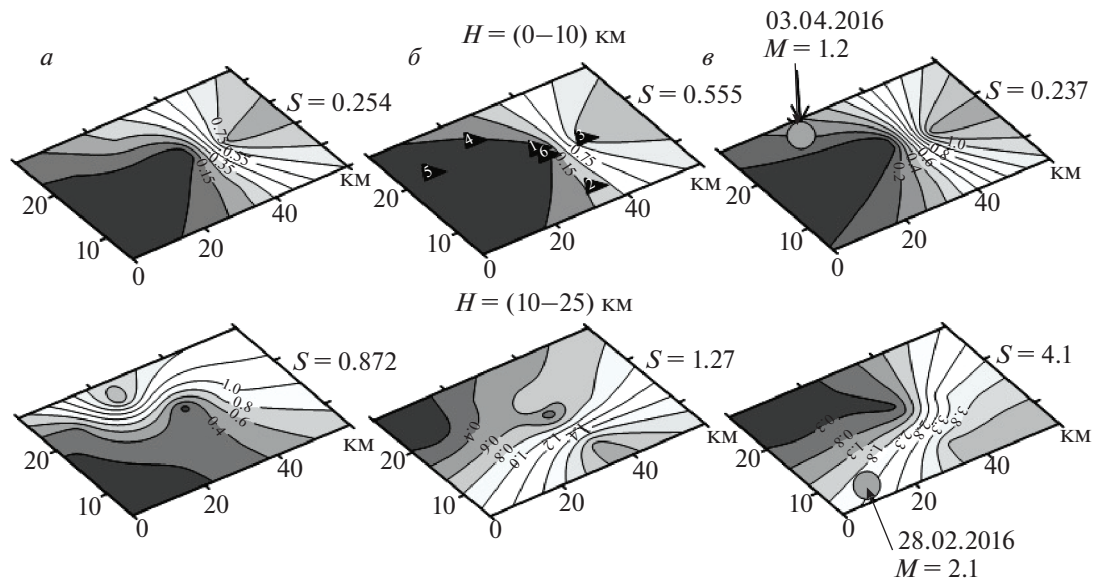


Рис. 6. Трехмерные модели геодинамических показателей района Кольской АЭС. Три этапа наблюдений: *a* – 26.10.2015–11.12.2015, *б* – 17.12.2015–21.02.2016, *в* – 28.02.2016–06.04.2016. Геодинамические показатели: γ – анизотропность (показана в виде горизонталей с сечением через 0.2), S – напряженное состояние; H – интервал глубин. Серые кружочки с датами и магнитудами – землетрясения, произошедшие во время мониторинга. Треугольники – пункты сейсмостанций (1, 2 и т.д.).

17.12.2015–21.02.2016 и 28.02.2016–06.04.2016. Показатели анизотропности γ и напряженного состояния S были получены для двух диапазонов глубин земной коры: 0–10 и 10–25 км (рис. 6). В первом и втором интервалах наблюдений геодинамические показатели изменяются в небольших пределах: γ – 0.15 (0.2)–1.6; S – 0.25–1.27 (см. рис. 6а, б). Во время третьего интервала наблюдений зафиксировано резкое изменение значений γ и S на глубинах 10–25 км, они максимально возросли с 1.2 и 0.237 до 4.0 и 4.1 соответственно (см. рис. 6в).

Одна из причин резкого повышения геодинамических значений – удаленное катастрофическое Индонезийское землетрясение, произошедшее 13.02.2016 г. с магнитудой $M = 7.8$. После регистрации этого землетрясения в районе Кол АЭС в течение 3-го этапа наблюдений были установлены интенсивные низкочастотные поверхностные волны. Колебания вызвали аномальное увеличение геодинамической активности: γ с 1.2 до 4.0, S с 0.237 до 4.1 (см. рис. 6в), которая неожиданно выразилась двумя наведенными землетрясениями 28.02.2016 г. с магнитудой $M = 2.1$ (очаг на глубине 25 км) и 03.04.2016 г. с магнитудой $M = 1.2$ (очаг на глубине 8 км) [9, 12]. Следовательно, геологическая среда района Кольской АЭС сейсмически восприимчива к внешним сильным землетрясениям и техногенным взрывам, происходящим на рудниках. Площадка АЭС подвержена негативному усилению сейсмической актив-

ности наведенного типа, что может сказаться на ее безопасности.

ВЫВОДЫ

В результате локального сейсмоэкологического мониторинга, организованного на полигонах в предгорной области Кавминвод и равнинных районах расположения атомных станций (Нижегородской, Балаковской и Кольской АЭС), созданы трехмерные модели глубинного и скоростного строения геологической среды и оценены геодинамические показатели γ , S . Участки с контрастными показателями впервые сопоставлены с особенностями тектонического строения геологической среды этих объектов.

В области Кавминвод по данным PS-волн от далеких землетрясений выявлены глубинные разломы и высокоскоростные объемы-ядра, обладающие свойствами сейсмогенной коры. Разломы соответствуют зонам перехода от высокоскоростных к низкоскоростным границам распространения обменных волн. Сейсмогенные объемы – это верхнемантийные интрузии, подъем которых вызывает аномально высокие упругие напряжения и деформации в слоях земной коры.

В районе Балаковской АЭС выявлена послонная рассогласованность глубинных деформаций относительно друг друга, которая является причиной концентрации относительно высоких напряжений, сдвиговых деформаций и сейсмической активности.

В районе Нижегородской АЭС определены участки интенсивной изменчивости геодинамических показателей, которые сопоставлены с известными геодинамически активными зонами. С ними связываются опасные для АЭС сгущения проявлений суффозионно-карстовых процессов.

В районе Кольской АЭС установлены относительно высокие значения геодинамических показателей, не характерные для равнинных платформ. Их значения близки к установленным для предгорной Кавминводской сейсмоактивной области.

Полученные результаты указывают на то, что платформенные территории, считающиеся низкоактивными, таковыми в отдельных районах не являются. Это представление крайне важно учитывать при оценке геоэкологической безопасности территорий особо опасных, технически сложных и уникальных объектов, большое число которых расположено на Восточно-Европейской платформе.

Статья подготовлена в рамках выполнения задания ИГЭ РАН по теме № 122022400105-9 “Прогноз, моделирование и мониторинг эндогенных и экзогенных геологических процессов для снижения уровня их негативных последствий”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гамбурцев А.Г. Сейсмический мониторинг литосферы. М.: Наука, 1982. 200 с.
2. Гик Л.Д. Физическое моделирование распространения сейсмических волн в пористых и трещиноватых средах // Геология и геофизика. 1997. Т. 38. № 4. С. 804–815.
3. Добровольский И.П. Теория подготовки тектонического землетрясения. М.: ИФЗ АН СССР, 1991. 216 с.
4. Егоркин А.В. Строение земной коры по сейсмическим геотраверсам. Глубинное строение территории СССР / Ред. В.В. Белоусов, Н.И. Павленкова, Г.И. Кветковская. М.: Наука, 1991. С. 118–135.
5. Коновалов Ю.Ф., Попова О.Г., Кухмазов С.У., Минаева Н.А., Туйкина А.С. Глубинное строение сейсмической зоны Кавказских Минеральных Вод // Разведка и охрана недр. 2001. № 2. С. 26–29.
6. Крылов С.В., Мишенькин Б.П., Мишенькина З.Р. Детальные сейсмические исследования литосферы на Р и S волнах. Новосибирск: Наука, 1993. 199 с.
7. Милановский Е.Е., Расцветаев А.В., Кухмазов С.У., Бирман А.С. Новейшая геодинамика Эльбурско-Минераловодской области Северного Кавказа // Геодинамика Кавказа. М.: Наука, 1989. С. 99–105.
8. Макеев В.М., Макарова Н.В. Деформации глубинных слоев земной коры Восточно-Европейской платформы: причины и следствия // Российский сейсмологический журнал. 2020. Т. 2. № 3. С. 57–67.
9. Николаев А.В. Проблемы наведенной сейсмичности. Наведенная сейсмичность. М.: Наука, 1994. 222 с.
10. Померанцева И.В., Мозженко А.Н. Сейсмические исследования с аппаратурой Земля. М.: Недра, 1997. С. 256.
11. Попова О.Г., Коновалов Ю.Ф., Попов М.Г. Особенности структуры земной коры сейсмоопасных и асейсмичных регионов по данным геотраверсов (на примере профилей Базальт, Рубин, Кварц и Армаш-Ахалцихе) // Вулканология и сейсмология, 1998. № 4. С. 178–189.
12. Попова О.Г., Серый А.В., Коновалов Ю.Ф., Недядько В.В. Влияние катастрофических землетрясений на напряженное состояние среды удаленных территорий // Сб. трудов восьмых геофизич. чтений им. В.В. Федьнского “Геофизика XXI столетия”. Тверь: ГЕРС, 2007. С. 200–204.
13. Попова О.Г., Серый А.В., Коновалов Ю.Ф. Результаты долговременного сейсмического мониторинга в сейсмоопасном районе Кавказских Минеральных Вод // Геоэкология. 2008. № 2. С. 135–140.
14. Попова О.Г., Попов М.Г., Аракелян Ф.О., Недядько В.В., Васютинская С.Д. Основные результаты по локальному сейсмо-экологическому мониторингу в разных регионах Российской Федерации // Геоэкология. 2016. № 6. С. 483–496.
15. Попова О.Г., Макеев В.М., Попов М.Г., Аракелян Ф.О., Недядько В.В. Геодинамическое состояние среды территорий, планируемых и действующих атомных электростанций, расположенных в разных тектонически активных областях // Геология и геофизика Юга России. 2017. № 4. С. 99–108.
16. Попова О.Г., Макеев В.М., Попов М.Г., Аракелян Ф.О., Недядько В.В. Оценка геодинамики платформенных территорий по результатам сейсмо-экологического мониторинга // Геоэкология. 2018. № 4. С. 40–52.
17. Попов М.Г., Попова О.Г. Изучение во времени и в пространстве напряженного состояния геологической среды // Геология и геофизика Юга России. 2020. № 10 (3). С. 79–93.
18. Шнейерсон М.Б. Введение в сейсмическую анизотропию: теория и практика. Тверь: ГЕРС, 2006. 160 с.
19. Aki K., Christoffersson A., Husebye E.S. Determination of the three-dimensional seismic structure of the lithosphere // J. Geophys. res. 1977. V. 82. № 2. P. 277–296.
20. Brady B.T. Theory of Earthquake // Pure Appl. Geophys. 1974. V. 112. № 4. P. 701–719.
21. Crampin S. A review of wave motion in anisotropic and cracked elastic media // Wave motion IVO. 1981. № 3. P. 343–391.
22. Crampin S. Seismic-wave propagation through a cracked solid: polarization as a possible dilatancy diagnostic // Geophys. J. R. astr. Soc. 1978. № 53. P. 426–467.

LOCAL SEISMO-ECOLOGICAL MONITORING RESULTS IN CONNECTION WITH TO THE GEOLOGICAL ENVIRONMENT ASSESSMENT

M. G. Popov^{a,#}, V. M. Makeev^{b,##}, and O. G. Popova^a

^a *Lomonosov Moscow State University,
Leninskiye Gory, 1, Moscow, 119991 Russia*

^b *Sergeev Institute of Environmental Geoscience the Russian Academy of Sciences,
Ulansky per., 13 building 2, Moscow, 101000 Russia*

[#] *E-mail: mgpopov@list.ru*

^{##} *E-mail: vmakeev@mail.ru*

The article presents the results of local seismoecological monitoring of the geological environment in the Caucasian Mineralnye Vody foothills and the Balakovo, Nizhegorodskaya and Kolskaya nuclear power plants (NPP) areas located on the East European platform. Using PS-waves of remote earthquakes, the geological structure and recent geodynamic conditions are studied in these locations. The areas with abnormal wave refraction are correlated for the first time with active dislocation zones. For the geological environment in the Caucasian Mineralnye Vody and Balakovo NPP areas, the three-dimensional models of depth and velocity structures were created using the kinematics of P and PS-waves from distant earthquakes. As a result, the linear high-speed and low-contrast structural heterogeneities were revealed, which are interpreted as fault zones and specific seismogenic areas. The faults correspond to transition zones from high- to low-speed boundaries of converted wave propagation. Seismogenic volumes are high speedy. Their formation is associated with the activity of upper mantle intrusions (diapirs), the rise of which causes high elastic straining in the earth's crust layers. For the Nizhegorodskaya and Kolskaya NPPs geological environment, three-dimensional geodynamic indicators models of anisotropy g and straining state S were built for different time intervals. As a result, these indicators anomalies were detected, pronounced in a sharp rise or reduction (sometimes almost to zero) of the geoenvironment anisotropy and strain-stress state indices. The reason is the mobility (activity) of tectonic dislocation zones. In the Nizhegorodskaya NPP area, the anomalies of geodynamic parameters are related to the extension zone pronounced in dip-slip fault fissures and suffusion-karst processes. In the Kolskaya NPP area, the distant Indonesian catastrophic earthquake with $M = 7.8$ influenced the change in the values of geodynamic indicators. The influence was expressed in the form of induced seismic activity. This permitted us to conclude about the elevated susceptibility of geoenvironment in the Kolskaya NPP area to external strong earthquakes and remote technogenic explosions in ore mines upon the mineral deposit extraction. The research proved that the local seismo-ecological monitoring is effective for identifying, evaluating and taking into account of deep areas with variable geodynamic parameters considered as seismogenic zones. In particular, this monitoring is acute for the geoenvironmental studies in low-active platform regions upon the engineering design of highly responsible, technologically complex and unique facilities (nuclear power plants, nuclear particle accelerators, radioactive waste disposal facilities, etc.), due to the induced seismicity problems.

Keywords: *converted waves, three-dimensional models, geodynamic parameters, anisotropy, straining, deep faults, active zones, seismicity, geological environment, monitoring, nuclear power plants*

REFERENCES

- Gamburtsev, A.G. *Seismicheskiy monitoring litosfery* [Lithosphere seismic monitoring]. Moscow, Nauka Publ., 1982, 200 p.
- Geek, L.D. *Fizicheskoye modelirovaniye rasprostraneniya seismicheskikh voln v poristykh i treshchinovatykh sredakh*. [Physical modeling of seismic wave propagation in porous and fractured environments]. *Geology and Geophysics*, 1997, v. 38, no. 4, pp. 804–815.
- Dobrovolsky, I.P. *Teoriya podgotovki tektonicheskogo zemletryaseniya* [The preparation tectonic earthquake theory]. M.: IFZ AN SSSR, 1991, 216 p.
- Egorin, A.V. *Stroyeniye zemnoy kory po seismicheskim geotraversam. Glubinnoye stroyeniye territorii SSSR* [The earth's crust structure according to seismic geotraverses. The USSR territory deep structure] / Ed. V.V. Belousov, N.I. Pavlenkova, G.I. Kvetkovskaya. Moscow, Nauka Publ., 1991, pp. 118–135.
- Konovalov, Yu.F., Popova, O.G., Kukhmazov, S.U., Minina, N.A., Tuikina, A.S. *Glubinnoye stroyeniye seismicheskoy zony Kavkazskikh Mineral'nykh Vod* [The Caucasian Mineralnye Vody seismic zone deep structure]. *Razvedka i okhrana nedr*, 2001, no. 2, pp. 26–29.
- Krylov, S.V., Mishenkin, B.P., Mishenkina, Z.R. *Detal'nyye seismicheskiye issledovaniya litosfery na P i S volnakh*. [Detailed seismic lithosphere researches on P and S waves.]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1993, 199 p.
- Milanovsky, E.E., Rastsvetaev, A.V., Kukhmazov, S.U., Birman, A.S. *Noveyshaya geodinamika El'brusko-Mineralovodskoy oblasti Severnogo Kavkaza* [The latest geodynamics Elbrus-Mineralnyvody region of the North Caucasus]. *Geodinamika Kavkaza* [Geodynamics of the Caucasus]. Moscow, Nauka Publ, 1989, pp. 99–105.
- Makeev, V.M., Makarova, N.V. *Deformatsii glubinnyykh slojev zemnoy kory Vostochno-Yevropeyskoy platformy: slichiny i sledstviya* [The earth's crust deep layers deformations of the East European platform: causes and

- consequences]. *Russian Seismological Journal*, 2020, vol. 2, no. 3, pp. 57–67.
9. Nikolaev, A.V. *Problemy navedennoy seysmichnosti. Navedenaya seysmichnost'*. [The induced seismicity problems. Induced seismicity]. Moscow, Nauka Publ., 1994, 222 p.
 10. Pomerantseva, I.V., Mozzenko, A.N. *Seysmicheskiye issledovaniya s apparaturou Zemlya*. [Seismic researches with equipment "Earth"]. Moscow, Nedra Publ., 1997, 256 p.
 11. Popova, O.G., Konovalov, Yu.F., Popov, M.G. *Osobennosti struktury zemnoy kory seysmoopasnykh i aseismichnykh regionov po dannym geotraversov (na primere profiley Bazal't, Rubin, Kvarts i Armash-Akhaltsikhe)* [Peculiarities of the earth's crust structure in seismically hazardous and aseismic regions according to geotraverses data (on the Basalt, Rubin, Quartz and Armash-Akhaltsikhe profiles example)], *Volcanology and Seismology*, 1998, no. 4, pp. 178–189.
 12. Popova, O.G., Seriy, A.V., Konovalov, Yu.F., Nedyadko, V.V. *Vliyaniye katastroficheskikh zemletryaseniy na napryazhennoye sostoyaniye sredey udalennykh territoriy* [The catastrophic earthquakes affection on the remote territories environment strain state]. Sat. Proceedings of the eighth Geophysical. readings to them. V.V. Fedynsky "Geophysics of the XXI century". Moscow, 2007, pp. 200–204.
 13. Popova, O.G., Seryi, A.V., Konovalov, Yu.F. *Rezultaty dolgovremennogo seysmicheskogo monitoringa v seysmoopasnom rayone Kavkazskikh Mineral'nykh Vod* [The long-term seismic monitoring results in the Caucasian Mineralnye Vody seismically hazardous zone]. *Geocology*, 2008, no. 2, pp. 135–140.
 14. Popova, O.G., Popov, M.G., Arakelyan, F.O., Nedyadko, V.V., *Vasyutinskaya S.D. Osnovnyye rezultaty po lokal'nomu seysmo-ekologicheskomu monitoringu v raznykh regionakh Rossiyskoy Federatsii* [The local seismoecological monitoring main results in Russian Federation various regions]. *Geocology*, 2016, № 6, pp. 483–496.
 15. Popova, O.G., Makeev, V.M., Popov, M.G., Arakelyan, F.O., Nedyadko, V.V. *Geodinamicheskoye sostoyaniye sredey territoriy planiruyemykh i deystvuyushchikh atomnykh elektrostantsiy, raspolozhennykh v raznykh tektonicheskii aktivnykh oblastiakh* [The territories of designed and operating NPPs natural environment geodynamic state located in various tectonically active regions]. *Geology and Geophysics of the South of Russia*, 2017, no. 4, pp. 99–108.
 16. Popova, O.G., Makeev, V.M., Popov, M.G., Arakelyan, F.O., Nedyadko, V.V. *Otsenka geo-dinamiki platformennykh territoriy po rezul'tatam seysmo-ekologicheskogo monito-ringa* [The platform areas geodynamics assessment on the seismoecological monitoring results]. *Geocology*, 2018, no. 4, pp. 40–52.
 17. Popov, M.G., Popova, O.G. *Izucheniye vo vremeni i v prostranstve napryazhennogo sostoyaniya geologicheskoy sredey* [Researches in time and space of the geological environment strain state]. *Geology and Geophysics of the South of Russia*, 2020, no. 10 (3), pp. 79–93.
 18. Shneerson, M.B. *Vvedeniye v seysmicheskuyu anizotropiyu: teoriya i praktika*. [Introduction to seismic anisotropy: theory and practice]. Moscow, GERS Publ., 2006, 160 p.
 19. Aki, K., Christofferson, A., Husebye, E.S. Determination of the three-dimensional seismic structure of the lithosphere. *J. Geophys. Res*, 1977, vol. 82, no. 2, pp. 277–296.
 20. Brady, B.T. Theory of Earthquake. *Pure Appl. Geophys*, 1974, vol. 112, no. 4, pp. 701–719.
 21. Crampin, S. A review of wave motion in anisotropic and cracked elastic media. *Wave motion IVO*, 1981, no. 3, pp. 343–391.
 22. Crampin, S. Seismic-wave propagation through a cracked solid: polarization as a possible dilatancy diagnostic. *Geophys J. R. astr. soc.*, 1978, no. 53, pp. 426–467.

ЗАГРЯЗНЕНИЕ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

УДК 504.1(571.55)

ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТОКСИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ
В ПОЧВАХ НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ ГОРНОРУДНЫХ ТЕРРИТОРИЙ
ВОСТОЧНОГО ЗАБАЙКАЛЬЯ© 2022 г. Б. Н. Абрамов^{1,*}, Т. Г. Цыренов^{1,**}¹ Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН,
ул. Недорезова, 16, Чита, 672002 Россия

*E-mail: b_abramov@mail.ru

**E-mail: master.of.pistols@mail.ru

Поступила в редакцию 05.04.2022 г.

После доработки 04.07.2022 г.

Принята к публикации 20.07.2022 г.

Установлены закономерности распределения токсичных элементов в почвах населенных пунктов горнорудных районов Восточного Забайкалья. Проведен сравнительный анализ распределения токсичных элементов в почвах селитебных территорий, хвостохранилищах и фоновых участках в районах отработанных и обрабатываемых месторождений золота, полиметаллов, олова и молибдена. Элементный состав определялся с использованием рентгенофлуоресцентного и ICP-MS методов исследования в аналитических лабораториях Геологического института СО РАН (г. Улан-Удэ) и ICP-MS ЗАО “SGS Vostok Limited” (г. Чита). Пробы для фоновых концентраций элементов в почвах отобраны вне зоны влияния техногенных объектов в водораздельных частях ландшафтов. Установлено, что в почвах горнорудных поселков и в техноземах хвостохранилищ отмечается уменьшение содержания токсичных элементов от I класса к III классу опасности. Определено, что опасной степенью загрязнения характеризуются почвы г. Бaley ($Z_c = 81.5$). Высокая степень загрязнения характерна для почв градообразующих поселков при горно-обогатительных комбинатах отработанных полиметаллических и молибденовых месторождений: Новый Акатуй ($Z_c = 56.8$), Вершино-Шахтаминский ($Z_c = 40.8$), Горный Зерентуй ($Z_c = 38.8$). Средняя степень опасности загрязнения почв отмечается в населенном пункте Шерловая Гора при ГОКе Шерловогорского оловополиметаллического месторождения ($Z_c = 25.5$). Низкий уровень загрязнения почв отмечается в пос. Жирекен ($Z_c = 9$) при ГОКе Жирекенского молибденового месторождения. Выявлено, что степень загрязнения почв населенных пунктов увеличивается по мере уменьшения расстояния от них хвостохранилищ.

Ключевые слова: почвы населенных пунктов, техноземы хвостохранилищ, токсичные элементы, суммарная степень загрязнения, Восточное Забайкалье

DOI: 10.31857/S0869780922050022

ВВЕДЕНИЕ

Восточное Забайкалье относится к числу российских регионов, обладающих значительными сырьевыми ресурсами цветных и драгоценных металлов. Рудные месторождения в Забайкалье начали обрабатываться с 1879 г. небольшими рудниками [2, 11]. На территории Забайкальского края известно более 1000 рудопроявлений и месторождений золота, молибдена, олова, редкометалльных и полиметаллических месторождений (рис. 1).

Природно-техногенный комплекс (ПТК) рудных месторождений включает природные и техногенные (созданные человеком) составляющие окружающей среды. В качестве техногенных объектов в настоящей работе рассматриваются тер-

ритории, измененные в результате деятельности горно-обогатительных комбинатов (ГОК) на отработанных и эксплуатирующихся месторождениях.

Масштабная добыча полезных ископаемых привела к формированию на территориях действующих и прекративших свою деятельность горнорудных комбинатов значительных по объемам техногенных образований. При этом наиболее опасное воздействие на окружающую среду оказывают продукты переработки горнорудных комбинатов, складированные в хвостохранилища [12–18]. Содержащиеся в них токсичные химические элементы подвергаются химической и биологической трансформации, что приводит к их интенсивной миграции и накоплению в почве и

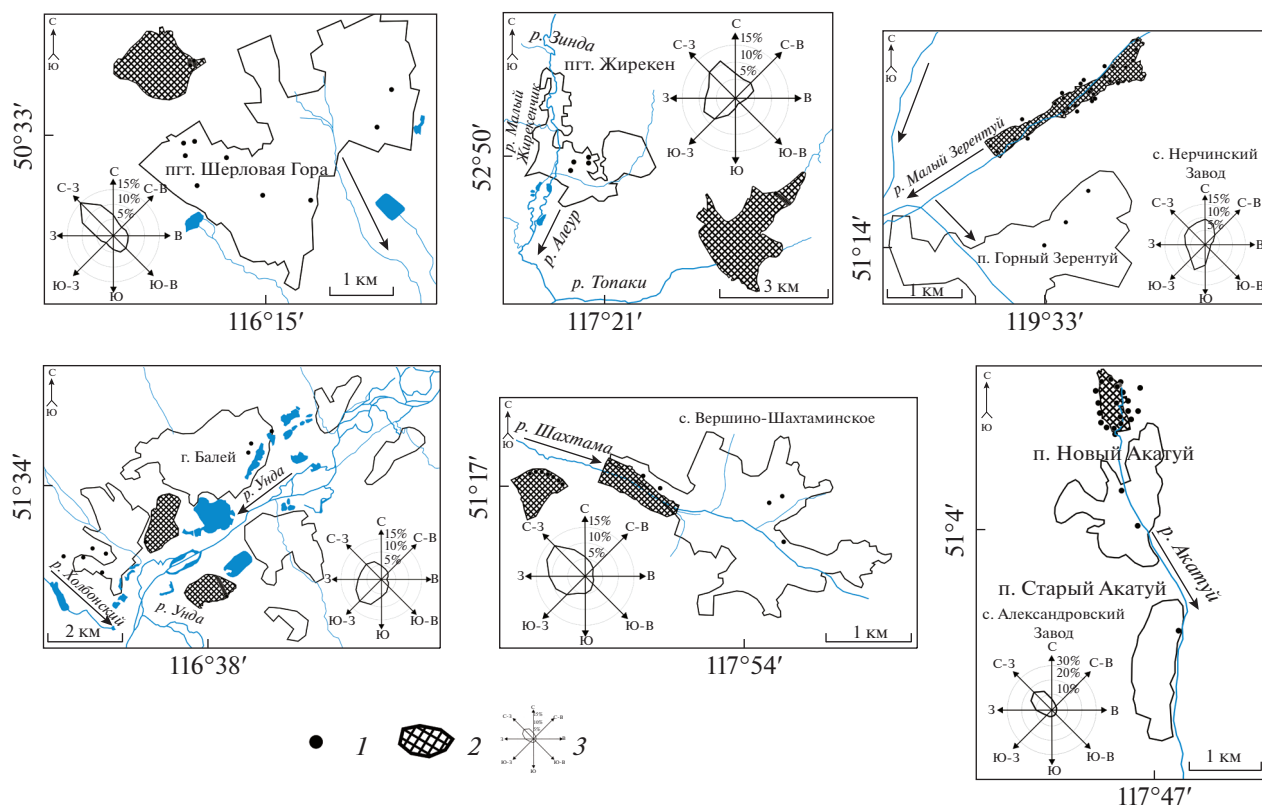


Рис. 1. Схема размещения населенных пунктов относительно хвостохранилищ в горнорудных территориях Восточно-Забайкалья. 1 – точки отбора проб, 2 – хвостохранилища, 3 – годовая роза ветров.

растительных объектах. Особую опасность представляют почвы населенных пунктов, обычно расположенных вблизи отвалов карьеров и хвостохранилищ. Негативное влияние хвостохранилищ и связанное с ними химическое загрязнение почвы, биоты, воды и воздуха сказывается на здоровье населения горняцких поселков. В постсоветский период многие горно-обогатительные комбинаты были закрыты и представляют собой руины. Мероприятия по снижению негативного воздействия техногенных объектов на окружающую среду не проводились, что привело к увеличению числа заболеваний среди населения [1, 3, 4].

Цель исследования – изучение закономерностей распределения токсичных элементов в почвах населенных пунктов, технозомах хвостохранилищ действующих и закрытых ГОКов золоторудных, полиметаллических, оловополиметаллических, молибденовых и редкометальных месторождений. Оценка негативного воздействия на окружающую среду ГОКов различных видов рудных месторождений проведена по соотношению предельно допустимых концентраций данных элементов в почвах и средних содержаний элементов в составляющих ПТК.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

К основным задачам исследования относились установление особенностей распределения токсичных химических элементов в ПТК различных типов рудных месторождений Восточного Забайкалья и расчет их потенциальной экологической опасности. Для их решения использованы данные содержаний токсичных элементов в технозомах хвостохранилищ, населенных пунктах и локальных фонах. Сведения по концентрациям химических элементов в рудах и технозомах хвостохранилищ получены при проведении исследований по базовым проектам Института природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН с 2000 по 2022 г. Кроме того, использованы опубликованные данные и сведения территориального геологического фонда по Забайкальскому краю (г. Чита). Для определения элементного состава в пробах использованы рентгенофлуоресцентный метод исследования в аналитических лабораториях Геологического института СО РАН (г. Улан-Удэ) и ICP-MS метод в ЗАО “SGS Vostok Limited” (г. Чита).

Данные по фоновым концентрациям элементов в почвах Восточного Забайкалья отсутствуют. В расчетах в качестве фоновых использованы

концентрации элементов в почвах, отобранных вне зоны влияния техногенных объектов на удалении от них от нескольких сотен метров до 2 км в водораздельных частях ландшафтов. Глубина отбора проб составляла 0–10 см. Вес грунтовой пробы составлял 1.0 кг. Пробы в населенных пунктах отбирались вдоль главных улиц и авто-трасс.

ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТОКСИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ПРИРОДНО-ТЕХНОГЕННЫХ КОМПЛЕКСАХ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ВОСТОЧНОГО ЗАБАЙКАЛЬЯ

Рассмотрим распределение химических элементов по токсической опасности в составляющих ПТК рудных месторождений Восточного Забайкалья. В соответствии с СанПиН 2.1.3684-21¹ по опасности химические элементы подразделяются на три класса: I класс – As, Cd, Hg, Pb, Zn; II класс – Co, Ni, Mo, Cu, Sn, Sb, Cr; III класс – Ba, V, W, Mn, Sr^{2,3} [9, 10].

При расчетах концентраций элементов в природно-техногенных комплексах рудных месторождений брались в расчет средние содержания элементов в почвах населенных пунктов. По данным В.А. Алексеенко и др. [5], средние содержания токсичных элементов в почвах селитебных территорий уменьшаются по мере снижения числа жителей в населенных пунктах. Так, в населенных пунктах с числом жителей от 300–700 тыс. среднее содержание As составляет 9.98 г/т, Pb – 45.6 г/т; в почвах малых поселков соответственно As – 5.2 г/т, Pb – 22.7 г/т. В Восточном Забайкалье число жителей в населенных пунктах соответствует малым населенным пунктам (табл. 1).

Для оценки показателя загрязнения почв рассчитаны суммарный показатель загрязнения почв населенных пунктов Z_c [10], а также значения “потенциальной токсичности” (ГЭр) по Р.В. Голевой и др. [8]. Установлено, что наибольшие по-

казатели степени загрязнения характерны для почв градообразующих населенных пунктов при ГОКах полиметаллических и золоторудных месторождений. Менее загрязнены почвы градообразующих населенных пунктов при ГОКах молибденовых и оловополиметаллических месторождений (см. табл. 1).

Существенное влияние на степень загрязнения почв населенных пунктов оказывает местоположение хвостов обогащения относительно хвостохранилищ. Населенные пункты, расположенные вблизи хвостохранилищ и ниже их по относительной высоте, характеризуются высокими значениями загрязнения почв. Наиболее высокими значениями степени загрязнения характеризуются почвы в н.п. Новый Акатуй, находящиеся ниже по течению ручья, омывающего хвостохранилище. Высокая степень загрязнения почв отмечена и в г. Балей, в черте которого размещены хвостохранилища (см. табл. 1).

Сравнительный анализ концентраций токсичных элементов и их соотношений в техноземах хвостохранилищ и почвах градообразующих горняцких поселков при ГОКах различных видов месторождений показал существенные отличия (см. табл. 1, рис. 2).

Для оценки потенциальной токсичности использовалась формула, предложенная в [8]:

$$\text{ГЭр} = \sum_{i=1, n} \text{Тл}_{(i)} \text{В}_{(i)}, \quad (1)$$

где $\text{Тл}_{(i)}$ – коэффициент литотоксичности элемента i ; $\text{В}_{(i)} = \text{X}_{(i)}/\text{Q}_{(i)}$, где $\text{X}_{(i)}$ – концентрации и $\text{Q}_{(i)}$ – кларк земной коры элемента i [7], n – количество рассматриваемых элементов.

Для оценки показателя загрязнения почв рассчитан суммарный показатель загрязнения (Z_c):

$$Z_c = K_{c1} + \dots + K_{c(n-1)}, \quad (2)$$

где n – количество учитываемых химических элементов; K_{ci} – коэффициент концентрации i -го компонента загрязнения, превышающий единицу. $K_{ci} = C_i/C_{\phi}$, где C_i и C_{ϕ} – содержание i -го химического элемента в почвах и грунтах [мг/кг], соответственно фактическое и фоновое.

Значения, характеризующие суммарное загрязнение Z_c по степени опасности [10], имеют следующие диапазоны: $Z_c < 16$ – низкий уровень; $16 < Z_c < 32$ – средний, умеренно опасный; $32 < Z_c < 64$ – высокий, опасный; $64 < Z_c < 128$ – максимальный, чрезвычайно опасный.

Согласно расчетам суммарного показателя загрязнения почв, опасной степенью загрязнения характеризуются почвы г. Балей ($Z_c = 81.5$); высокой степенью загрязнения – почвы поселков: Новый Акатуй ($Z_c = 56.8$), Вершино-Шахтаминский

¹ СанПиН 2.1.3684-21 Санитарно-эпидемиологические требования к содержанию территорий городских и сельских поселений, к водным объектам, питьевой воде и питьевому водоснабжению, атмосферному воздуху, почвам, жилым помещениям, эксплуатации производственных, общественных помещений, организации и проведению санитарно-противоэпидемических (профилактических) мероприятий), 2021. URL: <https://docs.cntd.ru/document/5-73536177>.

² ГОСТ 17.4.1.02-83 Охрана природы (ССОП). Почвы. Классификация химических веществ для контроля загрязнения. М.: Стандартинформ, 2008. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200012797>

³ МУ 2.1.7.730-99 Почва, очистка населенных пунктов, бытовые и промышленные отходы, санитарная охрана почв. Гигиеническая оценка качества почвы населенных мест. М.: Федеральный центр госсанэпиднадзора Минздрава России, 1999. 38 с.

Таблица 1. Средние содержания токсичных элементов в районе населенных пунктов горнорудных территорий Восточного Забайкалья, г/т

Элементы	As	Pb	Zn	Cd	Cu	Sn	Mo	Sb	Ba	Sr
<i>k</i>	5	10	50	–	20	10	2	1	500	300
ПДК*	2.0	32.0	23.0	2.0	3.0	53	254.0	4.5	165	600
Золоторудные месторождения										
Почва г. Балей. Число жителей 10 630. ГЭр = 4610 [2], <i>n</i> = 9										
<i>x</i>	232.7	155.6	252.6	10.0	31.1	5.3	2.7	96.0	925.7	182.2
<i>s</i>	296.5	193.6	354.5	–	16.9	4.9	1.5	119	323.6	229.2
<i>x/k</i>	46.5	15.6	5.1	–	1.0	0.5	1.4	96.0	1.9	0.6
<i>x/ПДК</i>	116.4	4.9	11.0	5.0	10.4	0.1	0.01	21.3	5.6	0.3
Техноземы хвостохранилища. <i>L</i> = 300 м, <i>n</i> = 9										
<i>x</i> *	793.0	23.0	43.9	13.0	35.8	9.7	4.0	159	439.6	192.6
<i>s</i>	355.2	8.1	27.1	–	19.9	4.8	1.7	30.3	81.2	37.0
<i>x</i> */ <i>x</i>	3.4	0.1	0.1	1.3	1.1	–	1.5	1.6	0.5	1.1
Фон, <i>n</i> = 2										
<i>x</i> **	8.2	55.0	58.0	0.6	–	2.5	–	4.4	640.0	245.0
<i>s</i>	7.1	3.5	14.1	–	–	0.7	–	–	14.1	35.4
<i>x</i> **/ <i>k</i>	1.6	5.5	1.2	–	–	0.3	–	4.4	1.3	0.8
Полиметаллические месторождения										
Почва н.п. Новый Акатуй. Число жителей 552. ГЭр = 4931 [2], <i>n</i> = 3										
<i>x</i>	620.3	416.0	1329.2	6.5	40.4	4.4	6.0	6.3	556.8	293.3
<i>s</i>	774.7	466.6	1473.6	6.9	15.5	3.2	2.5	4.8	134.8	108.3
<i>x/k</i>	124.1	41.6	26.6	–	2.0	0.4	3.0	6.3	1.1	1.0
<i>x/ПДК</i>	310.2	13.0	57.8	3.3	13.5	0.1	0.02	1.4	3.8	0.5
Хвостохранилище, <i>L</i> = 150 м, <i>n</i> = 10										
<i>x</i> *	10266.0	3752.0	11129.0	1.8	217.0	8.1	4.6	52.3	160.0	509.0
<i>s</i>	5030.9	2066.5	5704.9	1.0	145.4	5.5	2.3	29.6	116.4	228.6
<i>x</i> */ <i>x</i>	16.5	9.0	8.4	0.3	5.4	1.8	0.8	8.3	0.3	1.7
Фон, <i>n</i> = 2										
<i>x</i> **	50.0	51.0	110.5	–	10.0	3.0	18.0	1.3	830.0	200.0
<i>s</i>	169.7	35.4	75.7	–	–	–	–	1.8	0.2	–
<i>x</i> **/ <i>k</i>	10.0	5.1	2.2	–	0.5	0.3	9.0	1.3	1.7	0.7
Почва н.п. Горный Зерентуй. Число жителей 767. ГЭр = 2856 [2], <i>n</i> = 3										
<i>x</i>	266.6	459.0	712.7	3.2	56.7	13.0	5.0	25.7	550.0	170.0
<i>s</i>	57.7	333.5	595.4	2.7	30.5	6.1	2.7	12.9	98.5	60.8
<i>x/k</i>	53.3	45.9	14.2	–	2.8	1.3	2.5	25.7	1.1	0.6
<i>x/ПДК</i>	133.3	14.3	40.0	1.6	18.9	0.2	0.02	5.7	3.3	0.3
Хвостохранилище, <i>L</i> = 1 км, <i>n</i> = 37										
<i>x</i> *	10658.2	6847.6	17973.9	81.5	158.5	87.1	1.3	309	45.6	168.4
<i>s</i>	4793.6	2647.9	8289.0	34.2	54.3	35.4	0.4	105	12.3	23.1
<i>x</i> */ <i>x</i>	40.0	14.9	25.2	25.5	2.8	6.7	0.3	12.0	0.1	1.0
Фон, <i>n</i> = 9										
<i>x</i> **	35.4	56.9	116.5	0.3	33.0	4.5	1.4	5.5	475.1	116.1
<i>s</i>	11.5	37.9	38.2	0.1	8.2	1.1	0.6	2.5	40.1	26.4
<i>x</i> **/ <i>k</i>	7.1	5.7	2.3	–	1.7	0.5	0.7	5.5	0.9	0.4

Таблица 1. Окончание

Элементы	As	Pb	Zn	Cd	Cu	Sn	Mo	Sb	Ba	Sr
Оловополиметаллические месторождения										
Почва н.п. Шерловая Гора. Число жителей 11592. ГЭр = 864 [2], $n = 3$										
x	106.7	146.7	433.3	–	40.0	43.3	–	–		536.7
s	40.4	102.6	291.6	–	17.3	37.9	–	–		20.8
Хвостохранилище, $L = 300$ м, ГЭр = 7956 [2], $n = 9$										
x^*	50.0	1562.4	1702.7	13.7	186.7	595.4	2.0	54.6		345.6
s	20.0	1513.7	1205.6	13.4	76.8	459.2	–	20.4		32.8
x^*/x	0.5	10.6	3.9	–	4.7	13.8	–	–		0.6
Фон, $n = 3$										
x^{**}	30.2	14.0	101.5	0.4	–	11.0	–	1.3		590.0
s	–	1.4	16.3	–	–	7.1	–	0.1		14.1
x^{**}/k	6.0	1.4	2.0	–	–	1.1	–	–		1.2
Молибденовые месторождения										
Почва н.п. Вершино Шахтаминский. Число жителей 1091. ГЭр = 1683 [2], $n = 3$										
x	19.3	124.7	155.6	3.4	226.3	5.5	151.0	17.2		572.5
s	10.2	82.4	120.6	1.0	123.5	0.7	222.2	13.4		134.7
x/k	3.9	12.5	3.1	–	11.3	0.6	75.5	17.2		1.1
$x/ПДК$	9.6	3.9	6.8	1.7	75.4	0.1	0.6	3.8		3.5
Хвостохранилище, $L = 1$ км, $n = 7$										
x^*	113.9	929.1	1243.8	7.8	737.1	8.7	679.1	64.1		719.1
s	109.2	392.8	553.6	6.7	743.6	4.7	465.8	54.8		257.1
x^*/x	5.9	7.5	8.0	2.3	3.3	1.6	3.1	3.7		1.3
Фон, $n = 3$										
x^{**}	10.0	45.1	72.3	0.3	44.0	3.9	8.8	3.2		526.2
s	7.7	39.8	43.0	0.3	77.8	1.7	9.4	5.8		232.3
x^{**}/k	2.0	4.5	1.4	–	2.2	0.4	4.4	3.2		2.2
Почва н.п. Жирекен. Число жителей 4244. ГЭр = 621 [2], $n = 3$										
x	23.5	33.4	81.4	–	61.8	–	61.0	7.0		742.8
s	215	11.6	31.4	–	20.3	–	32.2	–		72.0
x/k	4.7	3.3	1.6	–	3.1	–	30.5	7.0		1.5
$x/ПДК$	11.8	1.0	3.5	–	20.6	–	0.2	1.6		4.5
Хвостохранилище, $L = 2.1$ км, $n = 11$										
x^*	37	64	83	7	500	30	181	–		643
s	13	41	44	0	227	0	177	–		33
x^*/x	1.6	1.9	1.0	–	8.1	–	3.0	–		0.9
Фон, $n = 3$										
x^{**}	29.6	31.3	70.2	–	25.4	–	28.1	–		760.7
s	31.6	6.6	5.4	–	3.7	–	8.4	–		154.6
x^{**}/k	5.9	3.1	1.4	–	1.3	–	14.0	–		1.5

ПДК* по СанПиН 1.2.3685–21 Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания, 2021. URL: <https://docs.cntd.ru/document/573500115>;

x – среднее арифметическое, s – стандартное отклонение, k – средние содержания элементов в почвах [6]; содержания по ПДК*: x^* – в технозомах хвостохранилищ, x^{**} – фоновые; L – расстояние от хвостохранилища до населенного пункта, n – число анализов, – нет данных.

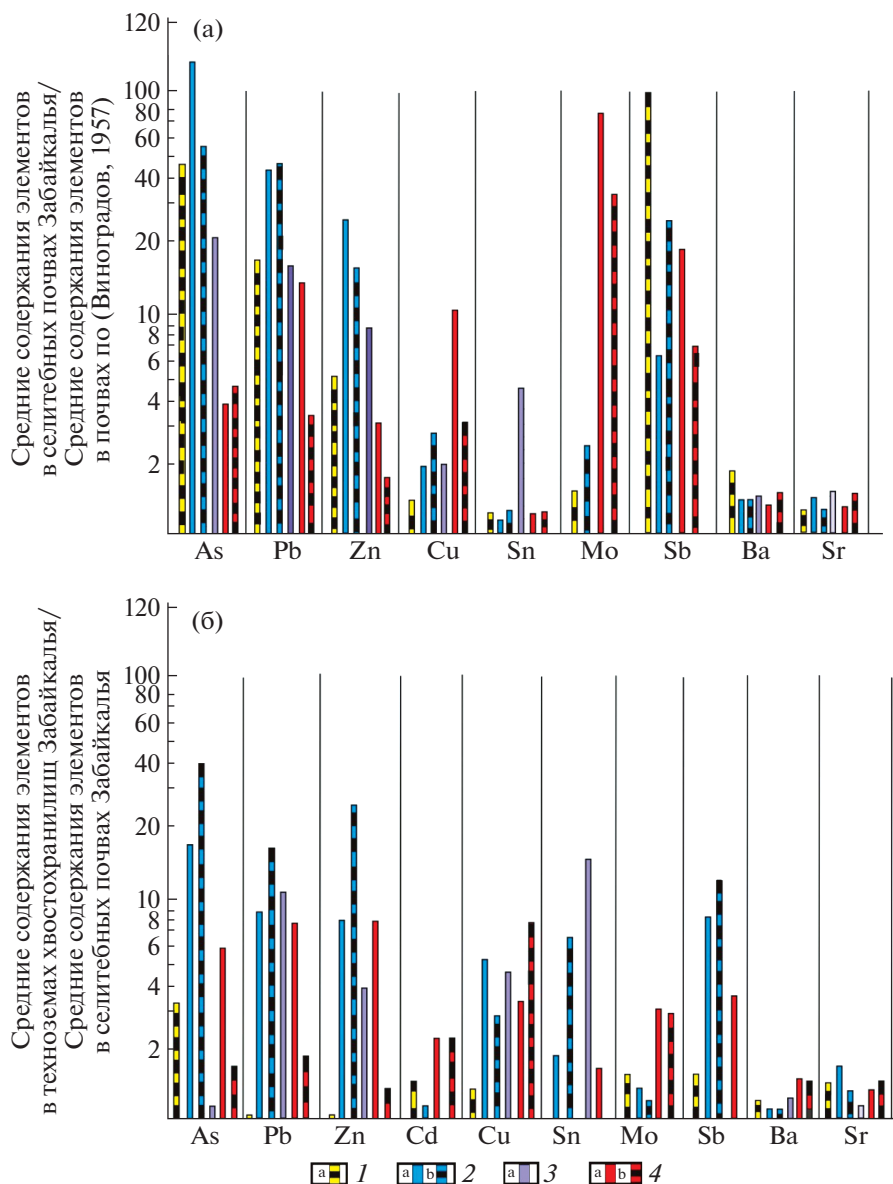


Рис. 2. Гистограммы распределения соотношений элементов в населенных пунктах горнорудных территорий Восточного Забайкалья: а – отношение средних значений токсичных элементов в почвах населенных пунктов рудных месторождений Восточного Забайкалья к средним значениям содержаний токсичных элементов в почвах [5]; б – отношение средних значений токсичных элементов в технозомах хвостохранилищ к средним значениям токсичных элементов в почвах населенных пунктов. 1а – г. Балей, 2 – а – н.п. Новый Акатуй, б – н.п. Горный Зерентуй; 3а – н.п. Шерловая Гора; 4 – а – н.п. Вершино-Шахтаминский, б – н.п. Жирекен.

($Z_c = 40.8$), Горный Зерентуй ($Z_c = 38.8$). Средняя степень опасности загрязнения почв отмечается в н.п. Шерловая Гора ($Z_c = 25.5$). Низкий уровень загрязнения почв отмечается в Жирекене ($Z_c = 9$). Наибольшими показателями потенциальной токсичности почв среди рассматриваемых населенных пунктов Восточного Забайкалья характеризуются г. Балей ($ГЭр = 4610$) и п. Новый Акатуй ($ГЭр = 4931$).

Для определения степени влияния конкретного химического элемента рассчитаны индексы геоаккумуляции (I_{geo}) в почвах населенных пунктов по методике, предложенной G. Müller. Для вычислений применялась следующая формула [14]:

$$I_{geo} = \log_2 \frac{C_n}{1.5BE_n}, \quad (3)$$

где C_n – измеренная концентрация соединений тяжелых металлов в образце; BE_n – среднее гео-

химическое фоновое значение измеряемых элементов.

Значения индекса подразделяются следующим образом:

$I_{\text{geo}} \leq 0$ – практически незагрязненный;

$0 < I_{\text{geo}} \leq 1$ – незагрязненный до умеренно загрязненного;

$1 < I_{\text{geo}} \leq 2$ – умеренно загрязненный;

$2 < I_{\text{geo}} \leq 3$ – средне загрязненный;

$3 < I_{\text{geo}} \leq 4$ – сильно загрязненный;

$4 < I_{\text{geo}} \leq 5$ – сильно загрязненный до чрезмерно загрязненного;

$I_{\text{geo}} > 5$ – чрезмерно загрязненный.

Повышенные значения индекса геоаккумуляции элементов отражают специфику основных добываемых элементов на рудниках исследуемых месторождений. Так, для н.п. Новый Акатуй и Горный Зерентуй, находящихся в зоне влияния полиметаллических месторождений, наибольшее воздействие на окружающую среду оказывают типичные для них химические элементы – As, Pb, Zn и Cd, в г. Балей (Балейское золоторудное месторождение) идет чрезмерное загрязнение почв по As, сильное по Cd и Sb. Среди рассматриваемых населенных пунктов наименьшими значениями индекса I_{geo} , не превышающими единицу, характеризуются почвы н.п. Жирекен.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Анализ содержаний токсичных элементов в почвах горняцких поселков Восточного Забайкалья показывает значительное превышение ПДК элементов I класса опасности, и в меньшей степени II и III класса опасности. Среди токсичных элементов в почвах поселков при ГОКах всех типов месторождений превалирует мышьяк. Так, в почвах Нового Акатуя (Акатуевское полиметаллическое месторождение) отмечается превышение ПДК As более чем в 310 раз, Pb – в 13 раз, Zn – в 57.8 раза (см. табл. 1). Такие высокие содержания отношений можно объяснить, помимо особенностей геологического строения, непосредственно местоположением населенных пунктов относительно хвостохранилищ. Поселок Новый Акатуй и хвостохранилище расположены в одной речной долине, при этом поселок расположен в 50–100 м ниже по течению ручья, дренирующего хвостохранилище, а хвостохранилища Балейского месторождения размещены в черте города.

Выявлено, что в ПТК полиметаллических месторождений отношения средних содержаний элементов в техноземах хвостохранилищ к средним значениям концентраций элементов в почвах населенных пунктов, в основном, превышают

таковые у других типов месторождений. Это можно объяснить значительными превышениями содержаний токсичных элементов в техноземах полиметаллических месторождений относительно техноземов других типов месторождений (см. табл. 1, рис. 2б). Причиной тому может быть наличие карбонатных составляющих во вмещающих породах полиметаллических месторождений и соответственно в материалах хвостохранилищ, снижающих миграционную способность элементов.

В расчетах суммарного показателя загрязнения почв учитываются фоновые содержания элементов в районах рассматриваемых месторождений, которые в зависимости от геологического строения фундамента имеют разные значения. Высокие показатели загрязнения почв селитебных территорий Балейского и Акатуевского месторождений коррелируются с высокими фоновыми содержаниями токсичных элементов в районах этих месторождений. Так, наблюдаются следующие соотношения фоновых концентраций к кларкам для Акатуевского месторождения: As – 360; Pb – 39; Zn – 4.5; Cd – 68.5; Балейского месторождения: As – 28.4; Pb – 2.8; Zn – 14.3; Cd – 16.7.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ распределения токсичных элементов в природно-техногенных комплексах горнорудных территорий Восточного Забайкалья выявил следующие закономерности.

1. В почвах горнорудных поселков и техноземах хвостохранилищ рудных месторождений Восточного Забайкалья отмечается закономерное уменьшение содержаний токсичных элементов от I класса опасности к III классу опасности.

2. Рассчитанные значения показателей суммарного загрязнения почв селитебных территорий (Z_c) показали, что опасной степенью загрязнения характеризуются почвы г. Балей ($Z_c = 81.5$). Высокой степенью загрязнения почв характеризуются поселки: Новый Акатуй ($Z_c = 56.8$), Вершино-Шахтаминский ($Z_c = 40.8$), Горный Зерентуй ($Z_c = 38.8$). Средняя степень опасности загрязнения почв отмечается в населенном пункте Шерловая Гора ($Z_c = 25.5$). Низкий уровень загрязнения почв отмечается в н.п. Жирекен ($Z_c = 9$).

3. Установлено, что расположение хвостов обогащения относительно населенных пунктов оказывает существенное влияние на показатели загрязнения почв. Чем ниже по относительной высоте и чем ближе населенные пункты находятся к хвостам обогащения ГОКов, тем выше значения загрязнения почв.

4. Высокие показатели загрязнения почв селитебных территорий коррелируются с высокими фоновыми содержаниями токсичных элементов в районах рудных месторождений. Так, наблюдаются следующие отношения фоновых концентраций для Акатуевского месторождения (фон/кларк): As – 360; Pb – 39; Zn – 4.5; Cd – 68.5; Балейского месторождения: As – 28.4; Pb – 2.8; Zn – 14.3; Cd – 16.7.

Работа выполнена в рамках госзадания ИПРЭК СО РАН № FUFР-2021-0006 “Геоэкология водных экосистем Забайкалья в условиях современного климата и техногенеза, основные подходы к рациональному использованию вод и их биологических ресурсов”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абрамов Б.Н.* Концентрации тяжелых металлов в техногенных ландшафтах Акатуевского полиметаллического месторождения (Восточное Забайкалье) // Вестник Воронежского государственного университета: География. Геоэкология. 2018. № 4. С. 67–71.
2. *Абрамов Б.Н., Еремин О.В., Филенко Р.А., Цыренов Т.Г.* Оценка потенциальной экологической опасности природно-техногенных комплексов рудных месторождений Восточного Забайкалья // Геосферные исследования. 2020. № 2. С. 64–75. <https://doi.org/10.17223/25421379/15/5>
3. *Абрамов Б.Н.* Оценка токсичности хвостохранилищ рудных месторождений Забайкальского края // Горно-информационно-аналитический бюллетень. 2021. № 11. С. 136–145. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_11_0_136
4. *Абрамов Б.Н.* Геоэкологическая характеристика природно-техногенных комплексов свинцово-цинковых месторождений Восточного Забайкалья // Вестник Воронежского университета. Серия геология. 2022. № 1. С. 67–76. <https://doi.org/10.17308/geology.2022.1/9101>
5. *Алексеев В.А., Алексеев А.В.* Химические элементы в геохимических системах. Кларки почв селитебных территорий. Ростов н/Д: Издательство Южного федерального университета, 2013. 380 с.
6. *Виноградов А.В.* Геохимия редких и рассеянных химических элементов в почвах. М.: Изд-во Акад. наук СССР, 1957. 238 с.
7. *Войткевич Г.В., Мирошников А.Е., Поваренных А.С., Прохоров В.Г.* Краткий справочник по геохимии. М.: Недра, 1977. 184 с.
8. *Голева Р.В., Иванов В.В., Куприянова И.И., Маринов Б.Н. и др.* Экологическая оценка потенциальной токсичности рудных месторождений (методические рекомендации). М.: “РИЦВИМС”, 2001. 53 с.
9. *Криночкина О.К., Стулов В.Г.* Учет влияния природной геохимической опасности территорий при оценке негативного воздействия горнопромышленных комплексов на окружающую среду // Международный научно-исследовательский журнал. 2016. № 7 (49). С. 111–113. <https://doi.org/10.18454/IRJ.2016.49.100>
10. *Саев Ю.Е., Ревич Б.А., Янин Е.П., Смирнова Р.С. и др.* Геохимия окружающей среды. М.: Недра, 1990. 335 с.
11. *Юргенсон Г.А.* Геологические исследования и горно-промышленный комплекс Забайкалья: История, современное состояние, проблемы, перспективы развития. К 300-летию основания Приказа рудокопных дел. Новосибирск: Наука, 1999. 574 с.
12. *Gholizadeh A., Boruvka L., Vařat R., Saberioon M., et al.* Estimation of Potentially Toxic Elements Contamination in Anthropogenic Soils on a Brown Coal Mining Dumpsite by Reflectance Spectroscopy: A Case Study // PLoS ONE, 2015. V. 10. № 2. e0117457. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0117457>
13. *Jacka J.K.* The Anthropology of Mining: The Social and Environmental Impacts of Resource Extraction in the Mineral Age // Annual Review of Anthropology, 2018. № 47. P. 61–77. <https://doi.org/10.1146/annurev-anthro-102317-050156>
14. *Müller G.* Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River // GeoJournal. 1969. V. 2. № 3. P. 108–118.
15. *Nemerov A.M., Shepelev I.I., Eskova E.N., Kniga Y.A., Orlegova N.V.* The use of non-toxic technogenic and natural materials to ensure the stability of disturbed ecosystems // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019. 315: 052012. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/315/5/052012>
16. *Onsachi J.M., Yakubu H.M., Shaibu M.M.* Evaluation of Potentially Toxic Elements (PTE) From Mine Effluence Discharge (Case Study Of National Iron Ore Mining Company (NIOMCO), Itakpe, Kogi State – North Central, Nigeria // The International Journal of Engineering and Science (IJES), 2018. V. 7. № 9: III. P. 47–54. <https://doi.org/10.9790/1813-0709034754>
17. *Otieno S.B., Ngumbi E., Odhiambo-Nyan'gaya C., Gakunju J.* Study of Spatial Distribution of Potentially Toxic Elements in a Nature Reserve in Langata Ecosystem // Journal of Health and Environmental Research, 2020. V. 6. № 4. P. 114–118. <https://doi.org/10.11648/j.jher.20200604.12>
18. *Reyes A., Thiombane M., Panico A., Daniele L., et al.* Source patterns of potentially toxic elements (PTEs) and mining activity contamination level in soils of Taltal city (northern Chile) // Environ. Geochem. Health, 2020. V. 42. № 8. P. 2573–2594. <https://doi.org/10.1007/s10653-019-00404-5>

PATTERNS OF TOXIC ELEMENT DISTRIBUTION IN SOILS OF SETTLEMENTS IN THE EASTERN TRANSBAIKALIA MINING AREAS

B. N. Abramov^{a,*} and T. G. Tsyrenov^{a,**}

^a Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, ul. Nedorezova, 16, Chita, 672002 Russia

*E-mail: b_abramov@mail.ru

**E-mail: master.of.pistols@mail.ru

The distribution patterns of toxic elements in soils have been revealed for populated areas in Eastern Transbaikalia mining districts. A comparative analysis of toxic element distribution in soils of residential areas, tailings ponds and background areas in the areas of worked-out and mined-out deposits of gold, polymetallic, tin and molybdenum has been carried out. Elemental composition was determined using X-ray fluorescent and ICP-MS methods in analytical laboratories of Geological Institute SB RAS (Ulan-Ude) and ICP-MS CJSC “SGS Vostok Limited” (Chita). Background concentrations of elements in soils were used in the calculations. Samples for background concentrations were taken outside the influence zone of technogenic objects at a distance of several hundred meters to 1–2 km from them, in watershed parts of landscapes. The weight of the soil sample was equal to 1.0 kg. Samples in settlements were taken along the main streets and main highways. It has been found that the content of toxic elements in soils of mining settlements and technozems of tailing dumps decreased from the first to the third hazard class. It has been determined that soils of Baley town are characterized by dangerous degree of pollution ($Z_c = 81.5$). Soils of township-forming settlements at mining and processing plants of worked-out polymetallic and molybdenum deposits are characterized by a high degree of pollution: Novy Akatuy ($Z_c = 56.8$), Vershino-Shakhtaminsky ($Z_c = 40.8$), Gorny Zerentuy ($Z_c = 38.8$). An average degree of soil contamination danger is noted in the settlement of Sherlovaya Gora at the Sherlovogorsk tin-polymetallic deposit mine ($Z_c = 25.5$). A low level of soil contamination is noted in Zhireken settlement ($Z_c = 9$) at the Zhireken molybdenum mine. The degree of soil contamination in settlements was found to increase with the decreasing distance from the tailing dumps.

Keywords: soils of settlements, technozems of tailing dumps, toxic elements, total contamination degree, Eastern Transbaikalia

REFERENCES

1. Abramov, B.N. *Kontsentratsii tyazhelykh metallov v tekhnogennykh landshaftakh Akatuevskogo polimetallicheskogo mestorozhdeniya (Vostochnoe Zabaikal'e)* [The concentrations of heavy metals in the Akatuyevskoye polymetallic deposit technogenic landscapes (Eastern Transbaikalia)]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geografiya. Geoekologiya*, 2018, no. 4, pp. 67–71. (in Russian)
2. Abramov, B.N., Eremin, O.V., Filenko, R.A., Tsyrenov, T.G. *Otsenka potentsial'noi ekologicheskoi opasnosti prirodnotekhnogennykh kompleksov rudnykh mestorozhdenii Vostochnogo Zabaikal'ya* [Assessment of potential environmental hazards of natural and man-made complexes of ore deposits (Eastern Transbaikalia, Russia)]. *Geosfernye issledovaniya*, 2020, no. 2, pp. 64–75. <https://doi.org/10.17223/25421379/15/5>. (in Russian)
3. Abramov, B.N. *Otsenka toksichnosti khvostokhranilishch rudnykh mestorozhdenii Zabaykal'skogo kraya* [Toxicity assessment of mine tailings ponds in Transbaikalia]. *Gorno-informatsionno-analiticheskii byulleten'*, 2021, no. 11, pp. 136–145. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_11_0. (in Russian)
4. Abramov, B.N. *Geoekologicheskaya kharakteristika prirodno-tekhnogennykh kompleksov svintsovo-tsinkovykh mestorozhdenii Vostochnogo Zabaikal'ya* [Geological characteristics of natural-technogenic complexes of lead-zinc deposits in the Eastern Transbaikalia]. *Vestnik Voronezhskogo universiteta. Seriya geologiya*, 2022, no. 1, pp. 67–76. <https://doi.org/10.17308/geology.2022.1/9101>. (in Russian)
5. Alekseenko, V.A., Alekseenko, A.V. *Khimicheskie elementy v geokhimicheskikh sistemakh. Klarki pochv selitebnykh territorii* [Chemical elements in geochemical systems. Clarks of soils of inhabited areas]. Rostov-on-Don, Southern Federal University Publ., 2013, 380 p. (in Russian)
6. Vinogradov, A.V. *Geokhimiya redkikh i rasseyannykh khimicheskikh elementov v pochvakh* [Geochemistry of rare and trace chemical elements in soils]. Moscow, Akad. nauk SSSR Publ., 1957, 238 p. (in Russian)
7. Voitkevich, G.V., Miroshnikov, A.E., Povarennykh, A.S., Prokhorov, V.G. *Kratkii spravochnik po geokhimii* [Brief reference book on geochemistry]. Moscow, Nedra Publ., 1977, 184 p. (in Russian)
8. Goleva, R.V., Ivanov, V.V., Kupriyanova, I.I., Marinov, B.N., et al. *Ekologicheskaya otsenka potentsial'noi toksichnosti rudnykh mestorozhdenii (metodicheskie rekomendatsii)* [Environmental assessment of potential toxicity of ore deposits (guidelines)]. Moscow, RITs-VIMS Publ., 2001, 53 p. (in Russian)
9. Krinochkina, O.K., Stulov, V.G. *Uchet vliyaniya prirodnoi geokhimicheskoi opasnosti territorii pri otsenke negativnogo vozdeistviya gornopromyshlennykh kompleksov na okruzhayushchuyu sredu* [Factoring natural geochemical hazard of territories into assessment of negative im-

- fact of mining complexes on the environment]. *Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal*, 2016, no. 7 (49), pp. 111–113. <https://doi.org/10.18454/IRJ.2016.49.100>. (in Russian)
10. Saet, Yu.E., Revich, B.A., Yanin, E.P., Smirnova, R.S., et al. *Geokhimiya okruzhayushchei sredy* [Environmental geochemistry]. Moscow, Nedra Publ., 1990, 335 p. (in Russian)
 11. Yurgenson, G.A. *Geologicheskie issledovaniya i gornopromyshlennyy kompleks Zabaykal'ya: istoriya, sovremennoe sostoyanie, problemy, perspektivy razvitiya. K 300-letiyu osnovaniya Prikaza rudokopnykh del* [Geological surveys and the mining and industrial complex of Transbaikalia: history, current state, problems, development prospects. To the 300th anniversary of the founding of the Order on ore-mining affairs]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1999, 574 p. (in Russian).
 12. Gholizadeh, A., Boruvka, L., Vařat, R., Saberioon, M. et al. Estimation of potentially toxic elements contamination in anthropogenic soils on a brown coal mining dumpsite by reflectance spectroscopy: a case study. *PLoS ONE*, 2015, vol. 10, no. 2: e0117457. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0117457>
 13. Jacka, J.K. The anthropology of mining: the social and environmental impacts of resource extraction in the mineral age. *Annual Review of Anthropology*, 2018, no. 47, pp. 61–77. <https://doi.org/10.1146/annurev-anthro-102317-050156>
 14. Müller, G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River. *GeoJournal*, 1969, vol. 2, no. 3, pp. 108–118.
 15. Nemerov, A.M., Shepelev, I.I., Eskova, E.N., Kniga, Y.A., Orlegova, N.V. The use of non-toxic technogenic and natural materials to ensure the stability of disturbed ecosystems. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, 315: 052012. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/315/5/052012>
 16. Onsachi, J.M., Yakubu, H.M., Shaibu, M.M. Evaluation of potentially toxic elements (PTE) from mine effluence discharge (case study of National Iron Ore Mining Company (NIOMCO), Itakpe, Kogi State – North Central, Nigeria). *The International Journal of Engineering and Science (IJES)*, 2018, vol. 7, no. 9: III, pp. 47–54. <https://doi.org/10.9790/1813-0709034754>
 17. Otieno, S.B., Ngumbi, E., Odhiambo-Nyan'gaya, C., Gakunju, J. Study of spatial distribution of potentially toxic elements in a nature reserve in Langata ecosystem. *Journal of Health and Environmental Research*, 2020, vol. 6, no. 4, pp. 114–118. <https://doi.org/10.11648/j.jher.20200604.12>
 18. Reyes, A., Thiombane, M., Panico, A., Daniele, L., Lima, A., Di Bonito, M., De Vivo, B. Source patterns of potentially toxic elements (PTEs) and mining activity contamination level in soils of Taltal city (northern Chile). *Environ. Geochem. Health*, 2020, vol. 42, no. 8, pp. 2573–2594. <https://doi.org/10.1007/s10653-019-00404-5>

УТИЛИЗАЦИЯ И ЗАХОРОНЕНИЕ ОТХОДОВ

УДК 550.424;628.4

ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ПОЛИГОНА ТКО ДЛЯ ОБОСНОВАНИЯ
МОНИТОРИНГОВЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
В ПОСТРЕКУЛЬТИВАЦИОННЫЙ ПЕРИОД© 2022 г. И. В. Галицкая^{1,*}, В. С. Путилина^{1,**}, И. А. Костикова^{1,***}¹ Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН,
Уланский пер., 13, стр. 2, Москва, 101000 Россия

*E-mail: galgeoenv@mail.ru

**E-mail: vputilina@yandex.ru

***E-mail: kostiran@yandex.ru

Поступила в редакцию 24.05.2022 г.

После доработки 20.06.2022 г.

Принята к публикации 25.06.2022 г.

На примере рекультивируемого полигона твердых коммунальных отходов (ТКО) предпринята попытка обосновать важность ориентированности инженерно-геологических и инженерно-экологических изысканий на получение данных для оценки существующей гидрогеохимической ситуации и прогноза ее изменения с целью обоснования рекультивационных мероприятий и программы мониторинга в пострекультивационный период. В качестве объекта исследования выбран полигон ТКО «Дубна Правобережная». Приводятся результаты изучения химического состава и загрязненности фильтрата, подземных вод и грунтов на участке расположения исследуемого полигона. Рассмотрен подход к оценке состояния свалочного тела и подземных вод в условиях дефицита информации. На основе полученных натурных и расчетных данных определено, что некоторые участки свалочного тела на момент исследования находились в фазе ацетогенеза, тогда как другие – в фазе активного метаногенеза. Проанализированы особенности поведения в подземных водах хлорид-иона, тяжелых металлов, соединений азота. Проанализирован уровень загрязненности поверхностного слоя грунтов, определены основные геохимические ассоциации тяжелых металлов, оценена опасность грунтов как вторичного источника загрязнения подземных вод. Результаты оценки состояния свалочного тела и подземных вод наглядно показали необходимость определения более полного и представительного перечня показателей и компонентов для достоверного представления о сложившейся ситуации на территории расположения полигонов ТКО.

Ключевые слова: полигон ТКО, рекультивация, загрязнение, фильтрат, подземные воды, окислительно-восстановительные зоны

DOI: 10.31857/S0869780922050034

ВВЕДЕНИЕ

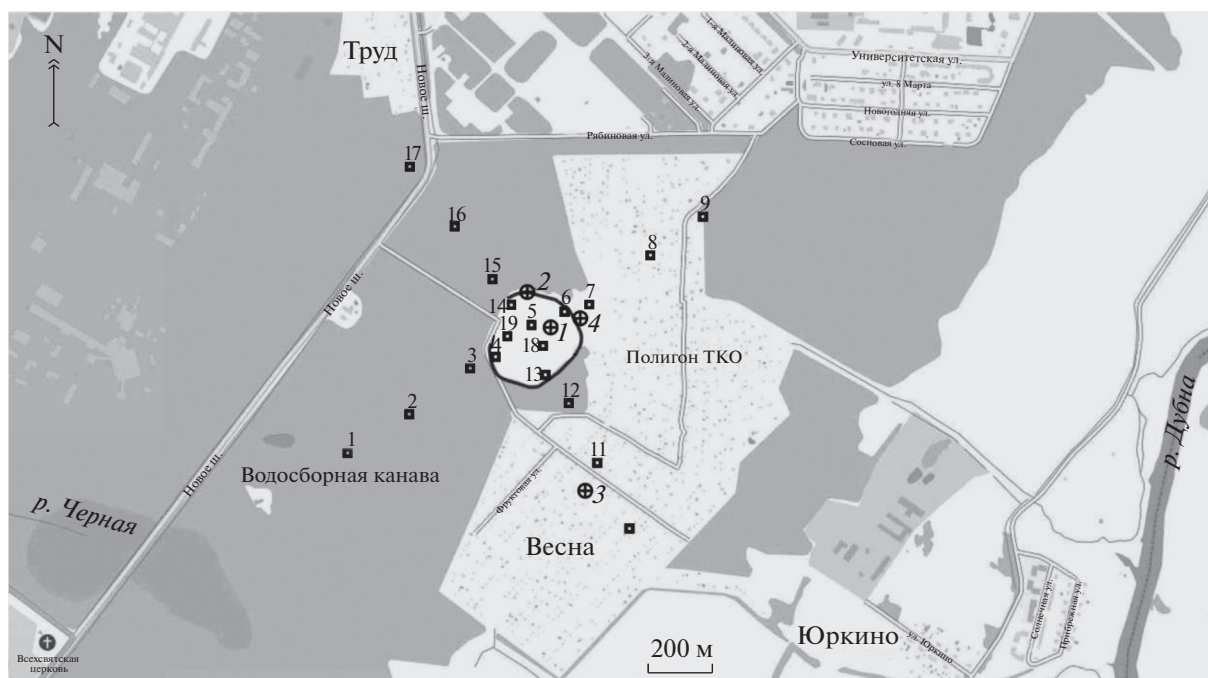
В настоящее время в России в рамках федерального проекта «Чистая страна» Национального проекта «Экология» проводится масштабная рекультивация свалок и полигонов ТКО, направленная на снижение негативного воздействия объектов накопленного вреда на окружающую среду. Московский регион лидирует в проведении мероприятий по закрытию исчерпавших свои возможности полигонов с последующей их рекультивацией.

При выборе направления рекультивации нарушенных земель в соответствии с ГОСТ Р 57446-2017¹

принимается во внимание целый ряд характеристик, в том числе фактическое и прогнозируемое состояние нарушенных земель к моменту рекультивации.

Необходимым этапом при разработке проектов рекультивации свалок и полигонов является проведение инженерных изысканий с целью получения необходимых и достаточных материалов для обоснования проектных решений, в том числе мероприятий по охране окружающей среды. Специфика территорий размещения свалок и полигонов определяется тем, что после рекультивации срок стабилизации свалочного тела может быть значительным, а загрязненные отложения на участке расположения объектов захоронения могут длительное время являться вторичным источником загрязнения подземных вод, а также

¹ ГОСТ Р 57446-2017 Наилучшие доступные технологии. Рекультивация нарушенных земель и земельных участков. Восстановление биологического разнообразия. Дата введения 2017-12-01. <https://docs.cntd.ru/document/1200145085>



⊕3 — точка отбора грунтовой воды; ■14 — пробные площадки отбора грунта

Рис. 1. Схема расположения полигона ТКО “Дубна Правобережная” с точками опробования.

представлять опасность для здоровья человека при распылении поверхностных слоев.

Цель настоящей статьи — обосновать важность ориентированности инженерно-геологических и инженерно-экологических изысканий на получение данных для оценки существующей гидрогеохимической ситуации и прогноза ее изменения, а также обоснования рекультивационных мероприятий и программы мониторинга в пострекультивационный период.

В качестве объекта исследования выбран полигон ТКО “Дубна Правобережная”.

Основные задачи:

- изучение химического состава фильтрата, подземных вод и грунтов на участке исследуемого полигона ТКО и оценка их загрязненности;
- определение стадии разложения свалочного тела на основе данных по составу фильтрата;
- исследование особенностей трансформации химического состава подземных вод, выяснение их окислительно-восстановительного состояния в зоне влияния свалки;
- анализ достаточности материалов инженерно-геологических и инженерно-экологических изысканий для прогноза гидрогеохимической ситуации и разработки программы мониторинга в пострекультивационный период.

ХАРАКТЕРИСТИКА ПОЛИГОНА ТКО

Полигон ТКО “Дубна Правобережная” расположен на северо-западе Московской области. Полигон эксплуатировался более 60 лет. В 2020 г. рекультивация полигона завершена (рис. 1).

По данным инженерно-геологических изысканий, проведенных ООО “КОМПЛЕКС ПРОЕКТ” в 2019 г., в геологическом строении до исследованной глубины 40 м принимают участие верхне-среднечетвертичные аллювиально-флювиогляциальные и среднечетвертичные моренные отложения, перекрытые сверху насыпными (техногенными) грунтами и почвенно-растительным слоем.

Насыпные (техногенные) грунты (tQIV) представлены пластиком, стеклом, металлом, древесиной, текстилем, органическим веществом, с поверхности до глубины 0.6 м перекрыты песчано-глинистым грунтом. Техногенные грунты представляют собой переслаивание ТКО мощностью ~5.0 м и суглинка тугопластичного мощностью 0.5–0.6 м. Мощность насыпных грунтов изменяется в широких пределах от 0.8 до 17.7 м.

Аллювиально-флювиогляциальные отложения (afQII-III) представлены суглинком опесчаненным, тугопластичным, реже — полутвердым, мощностью 0.7–1.6 м; песком пылеватым, глинистым мощностью 0.4–1.2 м. Моренные отложения (gQII) представлены суглинком, опесчаненным, с включением дресвы и щебня, полутвер-

дым и твердым, вскрытой мощностью 13.5–21.4 м. Максимальная мощность насыпи – 21 м.

Информация о коренных отложениях района исследования получена по данным архивных материалов.

Коренные отложения представлены:

– нижнемеловыми (K_1) глинами опесчаненными, с галькой и валунами, мощностью до 23 м; песками разнозернистыми, глинистыми, с редкой галькой, мощностью до 20 м;

– верхнеюрскими (J_3) глинами черными, с прослоями пестроцветной глины, мощностью до 1 м;

– верхнекаменноугольными (C_3) известняками белыми, трещиноватыми, мощностью 2.3 м; глинами пестроцветными с прослоями известняка и мергеля, мощностью 9.7 м; известняками белыми, серыми, крепкими, окварцованными, с частыми прослойками мергеля и глины, мощностью 62.0 м.

Гидрогеологические условия характеризуются наличием безнапорного водоносного горизонта, приуроченного к техногенным (насыпным) и средневерхнечетвертичным аллювиально-флювиогляциальным пескам. Мощность горизонта небольшая 0.7–1.0 м. Местным водоупором служат моренные суглинки мощностью примерно до 20 м.

Питание водоносного горизонта осуществляется за счет инфильтрации атмосферных и поверхностных вод. Разгрузка водоносного горизонта происходит в р. Волга и ее притоки (реки Дубна, Сестра, Черная), а также в канал им. Москвы.

Верхнекаменноугольный артезианский водоносный горизонт отделен от грунтовых вод толщей юрских глин (региональный водоупор) значительной мощности, что предполагает его хорошую защищенность.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для решения поставленных задач были использованы результаты инженерно-геологических и инженерно-экологических исследований, проведенных ООО “КОМПЛЕКС ПРОЕКТ” в 2019 г. на участке расположения полигона ТКО и прилегающих территориях.

Оценка состояния свалочного тела и подземной гидросферы проводилась на основании результатов анализа техногенных вод из дренажной канавы, подземных вод, отобранных под свалочным телом на глубине 17 м, у подножия полигона, с внешней стороны от обводной канавы с глубины ~1.2 м, а также в садовом товариществе из колодца, расположенном на расстоянии более 200 м к юго-востоку от полигона.

При анализе загрязненности подземных вод, а также фильтрата как источника опасности загрязнения подземных вод, применялись ПДК в

воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового назначения (ПДК_в) по СанПиН 1.2.3685–21². Кроме того, так как реки в районе расположения полигона имеют рыбохозяйственное значение, для оценки потенциальной опасности подземных вод как источников загрязнения поверхностных вод (при разгрузке) также проводилось сравнение с ПДК в водах водных объектов рыбохозяйственного значения (ПДК_{рх})³. Превышения ПДК представлены в виде обобщенных ассоциаций.

Сложность оценки состояния свалочного тела заключалась в том, что достоверное определение стадии и фазы разложения требует информации о целом ряде показателей: рН, химическом (ХПК) и биохимическом (БПК) потреблении кислорода, кислотности, щелочности, содержании летучих жирных кислот (карбоновые кислоты: уксусная, пропионовая, масляная), целлюлозы, лигнина; биохимического метанового потенциала (БМП); составе и содержании биогаза, микрофлоре (ацетогенные, сульфатредуцирующие и метаногенные бактерии).

Так как на исследуемом участке определялся ограниченный набор показателей, для определения состояния свалочного тела были использованы только такие данные и ориентировочные показатели как: ХПК, содержание растворенного кислорода, величина рН. В качестве основных исследуемых веществ (индикаторов загрязнения) выбраны соединения азота, хлорид-ион, сульфат-ион, железо, марганец, никель, кадмий, медь, цинк, хром.

Оценка уровня загрязненности грунтов проводилась на основании результатов инженерно-экологических изысканий. В ходе изысканий в грунтах были определены содержания валовых форм химических элементов I–III классов опасности. Оценка уровня химического загрязнения грунтов, как индикатора неблагоприятного воздействия на здоровье населения, проводилась по показателям, разработанным при сопряженных геохимических и геогигиенических исследованиях: коэффициенту концентрации химического вещества (K_c) и суммарному показателю загрязнения (Z_c). В качестве фоновых значений были использованы нормативные значения для средней полосы России для дерново-подзолистых

² СанПиН 1.2.3685–21 “Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания”. <https://docs.cntd.ru/document/573500115>

³ Приказ от 13.12.2016 № 552 “Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения”. <https://docs.cntd.ru/document/420389120>

песчаных и супесчаных почв по СП 11-102-97⁴ (региональный фон). При оценке загрязненности грунтов также использованы нормативы ПДК (ОДК) для почв по СанПиН 1.2.3685-21.

Оценка грунтов как вторичного источника загрязнения подземных вод проводилась путем сравнения концентрации химических элементов в отложениях с миграционным водным показателем вредности по СП 11-102-97 (приложение А). При определении степени опасности грунтов использованы следующие градации отношений содержания элемента к миграционному водному показателю вредности (К): $1 < K < 3$ – низкая степень опасности; $3 < K < 10$ – средняя степень опасности; $10 < K < 30$ – высокая степень опасности; $K > 30$ – очень высокая степень опасности.

Результаты оценки загрязнения вод и грунтов по отношению к различным значениям представлены в виде геохимических ассоциаций химических элементов, где индекс справа от символа химического элемента – величина коэффициента концентрации Кс, равная отношению концентрации элемента к ПДК.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБСУЖДЕНИЕ

Химический состав и загрязненность техногенных и подземных вод

Анализ данных инженерно-геологических изысканий показал, что для решения поставленных задач использование результатов определения химического состава подземных вод не представляется возможным. Проверка достоверности химических анализов воды путем сопоставления экспериментально найденной величины сухого остатка воды с расчетной величиной суммарной минерализации показала, что суммарная ошибка анализа составляла более 300%. В связи с этим при характеристике химического состава вод использованы в основном данные инженерно-экологических изысканий. Результаты анализа вод представлены в табл. 1.

Как показали результаты анализа, техногенные воды (фильтрат) характеризовались нейтральным значением pH – 7.43, минерализацией (по сухому остатку) – 5.5 г/дм³, ХПК – 2780 мг/дм³, перманганатной окисляемостью >100 мг/дм³, содержанием растворенного кислорода – 0.1 мг/дм³. Воды очень жесткие, общая жесткость – 13.9 мг-экв/дм³.

Ассоциации загрязняющих веществ⁵:

⁴ СП 11-102-97. Инженерно-экологические изыскания для строительства. <https://docs.cntd.ru/document/871001220>

⁵ В ассоциации загрязняющих веществ: Ф – фенолы, НП – нефтепродукты, цифра справа от наименования элемента – коэффициент концентрации, равный отношению концентрации загрязняющего вещества в воде к ПДК_в или ПДК_{рх}.

Cd(210) НП(84) Mn(5.7) Ni(5.5) Pb (2.8) Cl (>1.4) Ф(1.1) – по ПДК_в,

Ф(1110) НП(168) Mn(57) Cu(64) Cd(21) Zn(11) Ni(11) Fe(2.7) Sr(2.2) NO₂(1.5) Cr(1.2) – по ПДК_{рх}.

Подземные воды, отобранные из водоносного горизонта под свалочным телом с глубины 17 м, характеризовались нейтральным значением pH 7.61, минерализацией (по сухому остатку) – 2.2 г/дм³, общей жесткостью – 7.33 мг-экв/дм³, перманганатной окисляемостью >100 мг/дм³, содержанием растворенного кислорода – 3.1 мг/дм³. Ассоциация загрязняющих веществ:

НП(6.6) Cr(2.0) Ni(1.7) Cl(>1.4) – по ПДК_в,

Ф(82) НП(13.2) Mn(9.5) NO₂(9.0) Zn(6.3) Cl(>5) Cr(5.0) Fe(3.9) Ni(3.4) Sr(1.3) – по ПДК_{рх}.

Подземные воды, отобранные с внешней стороны от обводной канавы с глубины ~1.2 м, нейтральные (pH 7.67), с минерализацией (по сухому остатку) – 1.9 г/дм³, общей жесткостью – 6.43 мг-экв/дм³, содержанием растворенного кислорода – 5.3 мг/дм³, перманганатной окисляемостью – 68.4 мг/дм³.

Ассоциации загрязняющих веществ:

Mn(20.5) Ni(2.8) Ф(2.7) Fe (1.4) Cl(>1.4) – по ПДК_в,

Ф(270) Mn(205) NO₂(61.5) Cu(13) Zn(7.7) Ni(5.7) Cl(>5) Fe(4.2) Sr(1.9) SO₄(1.6) Cr(1.3) НП(1.2) – по ПДК_{рх}.

Подземные воды, отобранные из колодца в садовом товариществе, характеризуются нейтральным значением pH 7.51, минерализацией (по сухому остатку) – 2.8 г/дм³. Воды очень жесткие >50 мг-экв/дм³, содержание растворенного кислорода – 6.1 г/дм³, величина перманганатной окисляемости – 2.28 г/дм³.

Ассоциация загрязняющих веществ:

Ф(16) Zn(2.6) Cr(1.2) – по ПДК_в.

Превышения ПДК_{рх} не выявлены.

Поступление в подземные воды с фильтратом целого ряда веществ (фенолы, нефтепродукты, медь, кадмий, цинк, никель, железо, стронций, хром, хлориды, нитриты, сульфаты и др.) привело к их значительному загрязнению, особенно в сравнении с нормативами для водных объектов рыбохозяйственного значения. Судя по концентрации хлорид-иона, область загрязнения фильтратом в рассматриваемый период не распространилась на садовое товарищество.

Состояние свалочного тела

В большинстве случаев свалочное тело по составу неоднородно, и происходящие в результате сложной серии биологических и химических реакций процессы деградации различаются скоро-

Таблица 1. Химический состав фильтрата и подземных вод

Компонент	Проба 2 (техногенные воды – фильтрат)	Проба 1 (подземные воды, гл.17 м)	Проба 4 (подземные воды, гл. 1.2 м)	Проба 3 (колодец)
pH	7.43	7.61	7.67	7.51
Кислород раств., мгО ₂ /дм ³	0.1	3.1	5.3	6.1
Перманганатная окисляемость, мг/дм ³	>100	>100	68.4	2.28
Сухой остаток, мг/дм ³	5524	2244	1932	2838
Хлориды, мг/дм ³	>500	>500	>500	33.7
Сульфаты, мг/дм ³	36.1	27.3	158	46.3
Нитраты, мг/дм ³	4.50	5.00	19.6	3.72
Нитриты (по NO ₂), мг/дм ³	0.030	0.18	1.23	<0.02
Фториды, мг/дм ³	0.53	0.71	0.60	0.35
Свинец, мг/дм ³	0.028	0.0015	0.0028	0.0022
Кадмий, мг/дм ³	0.21	<0.00001	0.000075	<0.00001
Цинк, мг/дм ³	0.11	0.063	0.077	0.026
Медь, мг/дм ³	0.064	<0.01	0.013	<0.01
Никель, мг/дм ³	0.11	0.034	0.057	0.00025
Марганец, мг/дм ³	0.57	0.095	2.05	<0.01
Стронций, мг/дм ³	0.85	0.51	0.76	0.40
Железо, мг/дм ³	0.27	0.39	0.42	0.020
Нефтепродукты, мг/дм ³	8.42	0.66	0.060	0.0077
Хром общий, мг/дм ³	0.023	0.10	0.025	0.023
ХПК, мг/О ₂ дм ³	2780	766	450	16
АПАВ, мг/дм ³	0.89	0.44	0.31	0.12
Жесткость, мг-экв/ дм ³	13.9	7.33	6.43	>50
Фенолы, мг/дм ³	1.11	0.082	0.27	0.016

стью и степени разложения. Обычно считается, что свалочные отходы претерпевают по меньшей мере четыре фазы разложения: (1) аэробную, (2) анаэробную кислую (ацетогенез), (3) активного метаногенеза и (4) стабильного метаногенеза [9, 10, 13]. Позднее было предложено выделять дополнительную гумусовую фазу разложения.

Поскольку отходы существуют на свалке в течение многих лет (в разных секциях и на разной глубине), довольно часто различные части свалки находятся в разных фазах разложения. Существует тесная связь между состоянием разложения отходов и связанными с ним характеристиками фильтрата. Таким образом, состав фильтрата может варьировать в пределах свалочного тела.

Наиболее точная характеристика состава фильтрата может быть получена при опробовании техногенного водоносного горизонта в скважине, пробуренной в теле свалки. Однако в ряде

случаев из-за технических сложностей при бурении скважин непосредственно в свалочном теле для представления о составе фильтрата используют пробы воды, отобранные из канав, дренирующих техногенный водоносный горизонт.

На исследуемом полигоне ТКО в техногенных водах не определялось большинство показателей, которые позволили бы оценить динамику изменения состояния свалочного тела, современную стадию разложения отходов и возможность поступления компонентов из свалочного тела. Следует отметить, что аналогичная ситуация с изучением стадий разложения отходов сложилась на большинстве старых и ряде новых полигонов. Как один из возможных альтернативных подходов для оценки стадии разложения отходов, возможно использование такого ориентировочного показателя, как отношение БПК₅/ХПК.

Однако на рассматриваемом полигоне показатель БПК₅⁶ не определялся. Таким образом, представления о состоянии свалки можно составить только на основании результатов анализа в фильтрате рН, ХПК и растворенного кислорода.

Прежде всего следует особо остановиться на трактовке аэробных и анаэробных условий в свалочном теле. В работе [16] показано, что в подземных водах может наблюдаться восстановление нитрата даже в присутствии небольшого количества кислорода. По мнению [15], аэробные условия определяются концентрациями свободного кислорода, превышающими 1.0 мг/дм³.

На основании этих данных можно предположить, что для свалочного тела рассматриваемого полигона на момент исследования характерны анаэробные условия, так как содержание растворенного кислорода в техногенных водах (фильтрате) не превышало 0.1 мгО₂/дм³. Кроме того, следует учесть, что содержание растворенного кислорода в дренажных водах скорее всего выше, чем в фильтрате в свалочном теле полигона.

Высокое значение ХПК (2780 мгО₂/дм³) в техногенных водах исследуемого полигона также указывает на наличие анаэробных условий. Согласно [3], значения ХПК от 500 до 60000 мгО₂/дм³ характерны для анаэробных условий в стадии ацетогенеза. Однако в [13] начальную стадию фазы **активного метаногенеза** соотносят с предельными значениями от 500 до 4500 мгО₂/дм³.

Как показали результаты газеохимической съемки, выполненной в составе инженерно-экологических изысканий, в газовых пробах свалочных отложений присутствуют основные компоненты биогаза — метан и диоксид углерода. В большинстве газовых проб обнаруживается дефицит кислорода — менее 20%, что объясняется процессами анаэробного разложения органики. Содержание метана на разных участках изменяется от <0.05 до 20.28% об., что свидетельствует о разной интенсивности процессов метанообразования на различных участках.

Таким образом, на основании вышеприведенного анализа состава фильтрата можно предположить, что на момент исследования свалочное тело полигона “Дубна Правобережная” находилось в анаэробных условиях: на одних участках — в фазе ацетогенеза, тогда как на других — в фазе активного метаногенеза.

Достаточно сложной проблемой на территориях полигонов ТКО является определение окислительно-восстановительного потенциала (Eh) в фильтрате и подземных водах. В настоящее время в большинстве случаев этот показатель не определяется, тогда как его важность при оценке мигра-

ции переменновалентных элементов не вызывает сомнения.

Представление о величине Eh можно получить на основании данных о содержании в водах растворенного кислорода и экспериментально изученных природных эмпирических зависимостей между концентрациями кислорода в подземных водах и Eh [5]. Использование эмпирических зависимостей при интерпретации состояния вод на территории исследуемого полигона позволило ориентировочно оценить диапазон значений Eh в фильтрате — 0–150 мВ. Можно предположить, что в фильтрате в теле свалки содержание растворенного кислорода ниже определенного в дренажных водах, так как некоторое количество может поступать при выходе фильтрата в дренажную канаву и, соответственно, значения Eh также могут быть ниже.

Состояние подземных вод

Для прогноза изменения химического состава подземных вод на участках расположения свалок и полигонов ТКО большое значение имеют изучение современного состояния подземных вод, расположение окислительно-восстановительных зон в водоносных горизонтах и эпигнозная оценка их формирования [1].

Последовательность окислительно-восстановительных зон в водоносном горизонте определяется энергетической предпочтительностью протекающих реакций, таких как *аэробная* деградация, затем *анаэробная* деградация в порядке последовательного восстановления нитрата, марганца, железа, сульфата и, наконец, проявление метаногенеза. Эта последовательность возникает в том случае, когда в водоносном горизонте в значительных количествах присутствуют компоненты-окислители: в подземных водах — свободный кислород, нитраты, сульфаты; в твердой фазе — соединения железа (III) и марганца (IV). Если некоторые из перечисленных акцепторов электронов отсутствуют, то соответствующие зоны также не будут представлены.

Используя критерии выделения окислительно-восстановительных зон, можно сделать вывод, что по критерию содержания кислорода (>1 мг/дм³) подземные воды на всех опробованных участках исследуемого полигона находятся в аэробных условиях. Ориентировочные значения Eh, определенные на основании анализа природных эмпирических зависимостей [5], составляют в водах из скважины под свалочным телом — 150–350 мВ, из скважины за дренажной канавой — 210–400 мВ, из колодца — 220–450 мВ. Как видно, разброс значений достаточно велик, но важно отметить, что значение Eh во всех случаях положительно.

⁶ БПК₅ — показатель окисления за 5 сут.

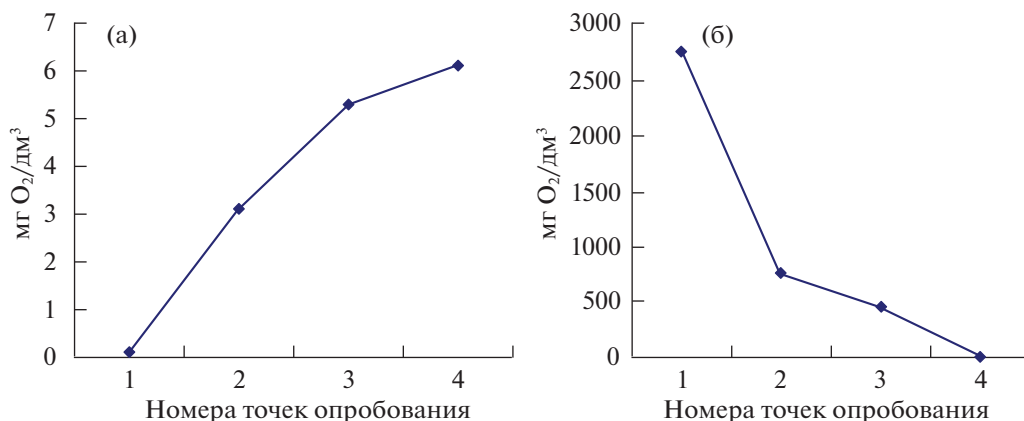


Рис. 2. Изменение содержания растворенного кислорода (а) и величины ХПК (б) в подземных и техногенных водах. Точки опробования: 1 – фильтрат; 2 – проба 1; 3 – проба 4; 4 – проба 3.

Содержание растворенного кислорода в подземных водах увеличивается при удалении от полигона ТКО (рис. 2а), соответственно увеличиваются и рассчитанные значения окислительно-восстановительного потенциала. В отличие от этого, величина ХПК при удалении от полигона уменьшается (рис. 2б), что свидетельствует о снижении содержания в подземных водах органического вещества.

На основании анализа распределения химических элементов в подземных водах можно сделать следующие выводы.

Хлориды. Информация о распределении хлоридов в подземных водах очень важна, так как данный консервативный компонент позволяет представить размер зоны влияния фильтрата на подземные воды, выделить участки, характеризующиеся различной степенью влияния полигона ТКО в различные временные периоды как в плане, так и в разрезе. К сожалению, на рассматриваемом полигоне ограниченное количество опробуемых участков не позволило определить фактическую границу ореола загрязнения. В материалах инженерно-экологических изысканий точные данные о концентрации хлорид-ионов отсутствуют (за исключением вод в садовом товариществе), только указывается, что под свалочным телом и в непосредственной близости концентрация хлоридов выше 500 мг/дм³. Таким образом, можно констатировать только факт влияния на подземные воды загрязненного фильтрата непосредственно на участке расположения полигона.

Следует отметить, что процессы биохимического и химического дехлорирования хлорсодержащих органических соединений в массиве отходов протекают на протяжении всего его жизненного цикла, могут продолжаться до 15–20 лет и сопровождаться поступлением в фильтрат ионов хлора [8]. Очевидно, что в рассматриваемый пе-

риод процессы дехлорирования хлорсодержащих органических соединений еще продолжались, что обусловило высокие концентрации хлорид-иона в фильтрате и подземных вод на участке расположения полигона.

Металлы. В рассматриваемый период из свалочного тела с фильтратом поступает целый ряд тяжелых металлов (ТМ). Количественно концентрацию металлов в фильтрате можно выразить следующей ассоциацией:



где цифра в нижнем индексе – концентрация элемента в мг/дм³.

Важно отметить, что концентрации ТМ, поступающих в подземные воды, превышают установленные нормативы, в ряде случаев достаточно существенно:

Cd(210) Mn(5.7) Ni(5.5) Pb(2.8) – по ПДК_в,

Mn(57) Cu(64) Cd(21) Zn(11) Ni(11) Fe(2.7) Sr(2.2) Cr(1.2) – по ПДК_{пх}.

В [6] было показано, что наиболее опасными стадиями жизненного цикла свалочного тела в отношении миграции ТМ в подземные воды являются фазы аэробного окисления и анаэробного окисления в фазе ацетогенеза, в течение которых происходит образование карбоновых кислот и снижение рН, что обуславливает активное растворение металлов и образование комплексных соединений с органической материей. Интенсивность миграции металлов в фильтрате за время “жизни” свалки изменяется по экспоненте и уменьшается на два порядка от фазы ацетогенеза до гумусовой фазы, но все же продолжается.

Как было отмечено выше, на момент исследования свалочное тело находилось на одних участках в фазе – ацетогенеза, на других – активного метаногенеза.

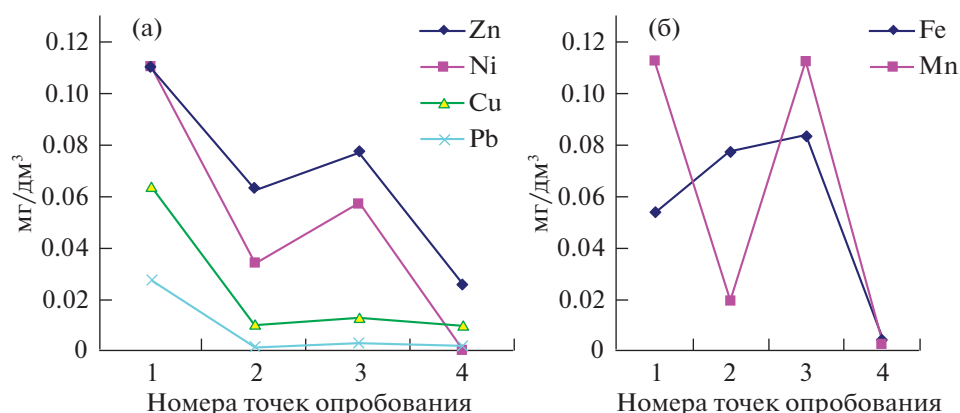


Рис. 3. Изменение содержания Zn, Ni, Cu, Pb (а) и Fe, Mn (б) в подземных и техногенных водах. Точки опробования: 1 – фильтрат; 2 – проба 1; 3 – проба 4; 4 – проба 3.

В фазе ацетогенеза в восстановительных условиях в свалочном теле многие металлы находятся в растворенном состоянии. Подвижность ТМ и опасность их выхода из свалочного тела частично зависят от комплексообразующей способности органической материи (в основном, гумусовых веществ) и сульфидов в свалочных отходах. Гуминовые и фульвокислоты могут увеличивать растворимость и подвижность ТМ в теле свалки за счет формирования растворимых комплексов при подкислении фильтрата. Однако значительная доля таких ТМ, как Cd, Ni, Zn, Cu, Pb, Cr может быть связана с коллоидными фракциями гумусового вещества, в первую очередь, с размером от 0.001 до 0.01 мкм [11, 12, 14]. Минерализация свалочного фильтрата существенно влияет на формирование и подвижность растворимых комплексов металлов, способствуя их коагуляции и оседанию на поверхности твердой фазы.

В метаногенной фазе образуется большое количество твердого гумусового вещества (ГВ), которое устойчиво в течение длительного периода времени и является прекрасным адсорбентом. Количество твердой фазы ГВ на несколько порядков превышает растворенную форму, и в этом случае можно предположить, что металлы связаны преимущественно в неподвижной фракции ГВ [6].

По данным [7] наибольшее сродство к органическому веществу характерно для меди, ее адсорбция составляет до 54.43% от общего количества металлов, адсорбированных ГВ, тогда как для Zn это 20.84%; Ni – 13.8%; Co – 7.61%; Mn – 4.32%. По-видимому, этим объясняется наиболее низкое содержание меди и более высокое содержание никеля, цинка, марганца в фильтрате рассматриваемого полигона.

Так как на момент изучения разложение отходов проходило через анаэробную стадию в фазе ацетогенеза и фазу активного метаногенеза, мож-

но предположить, что наиболее интенсивный выход ТМ из свалочного тела уже произошел, и в рассматриваемый период наблюдался процесс затухания.

По сравнению с подземными водами концентрации металлов в фильтрате выше. Исключение составляют железо и марганец (рис. 3). Различия в концентрации железа в принципе незначительны для того, чтобы делать обоснованные выводы о причинах формирования повышенных концентраций элемента, которые могут быть обусловлены не только техногенным, но и природным генезисом. Поведение стронция, никеля и цинка в целом аналогично: уменьшение концентрации элементов в водах под свалкой, с последующим увеличением в водах на участке рядом со свалкой и наиболее низкое содержание в водах колодца.

Затруднения с выводами о состоянии железа в подземных водах обусловлены отсутствием точной информации о величинах Eh и миграционных формах железа, в особенности его комплексах с органическими веществами гумусового ряда – фульво- и гуминовыми кислотами. На основании соотношения pH и ориентировочных значений Eh можно предположить, что в подземных водах на участке полигона железо находится преимущественно в форме Fe^{2+} (так как Eh в основном <250 мВ).

В грунтовых водах в садовом товариществе железо присутствует в форме Fe^{3+} (Eh >250 мВ). Возможно на начальных этапах функционирования полигона, железо, поступающее с фильтратом в подземные воды, осаждалось на окислительном барьере в виде гидроксидов. Гидроксиды железа и марганца имеют сильно развитую поверхность и являются прекрасным сорбентом для многих металлов, тем самым снижают их подвижность. Железо в различных формах может быть основным регулятором процессов адсорбции-осаждения и таким образом ограничивать протяженность

анаэробной части шлейфа фильтрата. В дальнейшем, при развитии более восстановительных условий, ранее осажденное железо могло восстанавливаться, и сорбированные на свежесозданном гидроксиде железа ТМ могли переходить в подземные воды.

Таким образом, потенциально возможны следующие пути поступления ТМ в подземные воды: 1 – со свалочным фильтратом, 2 – при восстановлении ранее осажденных гидроксидов железа и перехода сорбированных на них металлов в подземные воды.

Соединения азота. К сожалению, при инженерно-экологических изысканиях в отличие от инженерно-геологических в фильтрате и подземных водах не определялось содержание иона аммония, что весьма важно при определении окислительно-восстановительных трансформаций азота. Как отмечалось выше, от использования результатов определения химического состава вод при инженерно-геологических изысканиях из-за сомнений в достоверности данных пришлось отказаться. Однако, скорее всего, отмеченные ошибки связаны с результатами определения или расчета макрокомпонентов, поэтому мы сочли возможным привести результаты определения соединений азота. По данным инженерно-геологических изысканий, в техногенных и подземных водах на участке расположения полигона концентрации иона аммония и нитратов составляли соответственно 18.8–23.1 и 7.2–8.8 мг/дм³, т.е. состав вод был преимущественно аммонийным. Преимущественно аммонийный состав подтверждается и расчетами величины Eh. По данным [5], в околонейтральных подземных водах при Eh менее 200 мВ преобладает NH₄⁺, а при больших – NO₃⁻.

Таким образом, в фильтрате и подземных водах под свалочным телом, по-видимому, преобладает ион-аммоний. В водах в скважине за дренажной канавой преобладает нитрат-ион, и можно предположить, что в результате процесса нитрификации на этом участке происходит существенное увеличение концентрации нитрат-иона, поступающего с фильтратом.

Загрязнение грунтов

Уровень загрязненности поверхностного слоя грунтов на рассматриваемой территории существенно изменялся по площади. Ассоциации ТМ, превышающих региональный фоновый уровень, представлены в табл. 2. Максимальное загрязнение ТМ было зафиксировано в пунктах 5 и 6, расположенных на свалочном теле (см. рис. 1).

Ассоциации ТМ на данных участках имели следующий вид:

Cu(41.3) Zn (10.5) Cd(10.3) Hg(4.7) Ni(1.7) Pb(1.4).
Hg(69.2) Cu(2.6) Cd(1.7) Zn(1.1).

Таблица 2. Ассоциации химических элементов в поверхностном слое грунта (глубина отбора всех проб 0.0–0.2 м)

№ пункта отбора	Ассоциации	Z _c
1	Cd(2.8)	2.8
2	Cd(2)	2
3	Cd(3.1)	3.1
4	Cu(2.9) Cd(1.7) Zn(1.1)	3.59
5	Hg(69.2) Cu(2.6) Cd(1.7) Zn(1.1)	71.6
6	Cu(41.3) Zn(10.5) Cd(10.3) Hg(4.7) Ni(1.7) Pb(1.4)	64.9
7	Cd(1.3) Cu(1.3) Hg(1)	1.6
8	Zn(2.2) Cd(1.8) Cu(1.7) Hg(1.4) Pb(1.2)	4.4
9	превышения ПДК отсутствуют	
10	Zn(1.3)	1.3
11	Zn(2.6)	2.6
12	Cu(1.2)	1.3
13	Cu(4.4) Zn(1.6) Cd(1.5)	5.58
14	Cu(2.9) Cd(1.8) Zn(1.1)	3.7
15	превышения ПДК отсутствуют	
16	превышения ПДК отсутствуют	
17	Cd(1.6)	1.6
18	Cd(3.4)	3.4
19	Cd(1.2) Cu(1.1)	1.2

Величина Z_c составляла соответственно 71.6 и 64.9 (опасная категория загрязнения). На остальных участках ассоциация чаще всего была представлена одним элементом – кадмием, медью или цинком, или сочетанием данных элементов, величина Z_c не превышала 5.5 (допустимая категория загрязнения).

По отношению к ПДК/ОДК отмечено превышение нормативов только на участках максимального загрязнения: в пункте 5 – по ртути (3.3 ПДК), в пункте 6 – по меди (4.7 ПДК) и цинку (до 2.1 ПДК).

Кроме того, по результатам инженерно-экологических изысканий, проведенных ООО «КОМПЛЕКС ПРОЕКТ», в поверхностном слое грунтов отмечено превышение ПДК на ряде участков – по содержанию полихлорбифенилов (до 12 ПДК), в пунктах 6 и 18 – по содержанию подвижной серы (до 1.4 ПДК), в пунктах 7 и 8 – по содержанию 3,4-бензпирена более (до 1.5 ПДК).

Существенный интерес представляет оценка опасности загрязненных почв как вторичного источника загрязнения подземных вод.

По отношению к миграционному водному показателю вредности наиболее существенные превышения норматива отмечены только на участке

максимального загрязнения (пункт 6) – Cu(8.6) Ni(3.7) Zn(1.8). Здесь зафиксирован средний уровень загрязнения по меди и никелю, низкий – по цинку. В пунктах 5, 14, 18 зафиксированы превышения норматива по цинку до 1.2 ПДК (низкий уровень загрязнения).

Полученные данные позволили установить уровень загрязнения грунтов на рассматриваемом участке и определить основные геохимические ассоциации тяжелых металлов по отношению к региональному фону и миграционному водному показателю вредности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На примере полигона “Дубна правобережная” представлен подход к оценке состояния свалочного тела и подземных вод в условиях отсутствия информации о минимально необходимых показателях (Еh, БПК) и концентрациях компонентов (хлорид-иона, иона аммония). Использование экспериментально изученных природных эмпирических зависимостей между концентрациями кислорода в подземных водах и Еh позволило ориентировочно определить величины окислительно-восстановительного потенциала в техногенных (фильтрате) и подземных водах.

На основании изучения содержания растворенного кислорода, значения ХПК, результатов газгеохимической съемки, расчетных значений Еh в фильтрате установлено, что на момент исследования свалочное тело находилось в анаэробных условиях, на одних участках – в фазе ацетогенеза, на других – в фазе активного метаногенеза.

Ограниченное количество опробуемых скважин и отсутствие точных данных по концентрации в техногенных и подземных водах хлорид-иона (как оптимального индикатора распространения загрязнения) не позволили определить фактическую границу ореола загрязнения. Представляется возможным констатировать только факт влияния загрязненного фильтрата на подземные воды первого от поверхности водоносного горизонта на участке расположения свалочного тела и отсутствие влияния на расстоянии 200 м.

Так как на момент изучения разложение отходов проходило через анаэробную стадию в фазах ацетогенеза и активного метаногенеза, было сделано предположение, что наиболее интенсивный выход тяжелых металлов из свалочного тела уже произошел, и в рассматриваемый период наблюдался процесс затухания. Потенциально возможные следующие пути поступления тяжелых металлов в подземные воды: 1 – со свалочным фильтратом, 2 – при восстановлении ранее осажденных гидроксидов железа и перехода сорбированных на них металлов в подземные воды.

В связи с отсутствием в материалах инженерно-экологических изысканий данных о концентрации в водах аммонийного азота суждение о соотношении различных форм азота в основном основывалось на представлении об окислительно-восстановительном состоянии подземных вод (по расчетным значениям). По-видимому, в фильтрате и подземных водах под свалочным телом преобладает ион аммония, в водах за дренажной канавой – нитрат-ион, так как в результате процесса нитрификации на этом участке происходит существенное увеличение нитрат-иона, поступающего с фильтратом. Опробование подземных вод по разреженной сети не позволило оконтурить различные окислительно-восстановительные зоны.

Результаты оценки состояния свалочного тела и подземных вод наглядно показывают важность определения более полного и представительного перечня показателей и компонентов для обоснованных выводов о сложившейся ситуации.

Изучение загрязненности поверхностного слоя грунтов позволило установить уровень загрязнения и определить основные геохимические ассоциации тяжелых металлов. Однако следует отметить, что использование регионального фона при оценке коэффициентов концентрации и суммарного показателя загрязнения может быть причиной получения ошибочных результатов. Как показано в [2, 4], использование различных фоновых параметров (региональных и базисных) при оценке уровня загрязнения грунтов может существенно повлиять на структуру геохимических ассоциаций, отражающих уровень аномальности химических элементов, величину Zc и, соответственно, категорию загрязнения.

Недостатки использования рассмотренного подхода к оценке грунтов зоны аэрации как источника вторичного загрязнения подземных вод по миграционному водному показателю вредности в основном связаны с тем, что он не позволяет количественно оценить влияние вторичного источника загрязнения на подземные воды и время достижения загрязняющими компонентами уровня грунтовых вод. Кроме того, миграционный водный показатель вредности разработан для ограниченного количества химических элементов.

Для оценки опасности зоны аэрации как вторичного источника загрязнения подземных вод наиболее перспективным является подход, заключающийся в моделировании влаго- и массопереноса (прогноз концентраций, поступающих на уровень грунтовых вод в заданные периоды времени, и в разрезе зоны аэрации).

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ № 22-17-00045 и гранта РФФИ № 20-05-00574.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Галицкая И.В., Путилина В.С., Юганова Т.И. Формирование зональности окислительно-восстановительных состояний в водоносных горизонтах под влиянием полигонов и свалок ТБО // Геоэкология. 2008. № 5. С. 401–410.
2. Галицкая И.В., Костикова И.А. Изучение загрязненных грунтов как вторичного источника загрязнения на территориях размещения полигонов ТКО // Сергеевские чтения. Фундаментальные и прикладные вопросы современного грунтоведения. Вып. 23. М.: Изд-во “Геоинфо”, 2022. С. 348–354.
3. Глушанкова И.С. Моделирование состава фильтрационных полигонов захоронения твердых бытовых отходов // Геоэкология. 2004. № 4. С. 334–341.
4. Глушкова М.В., Галицкая И.В. К вопросу выбора фоновых значений при оценке уровня химического загрязнения грунтов на территориях городских свалок // Сергеевские чтения. Вып. 5. М.: ГЕОС, 2003. С. 237–241.
5. Крайнов С.Р., Швец В.М. Гидрогеохимия. М.: Недра, 1992, 463 с.
6. Путилина В.С., Галицкая И.В., Юганова Т.И. Влияние органического вещества на миграцию тяжелых металлов на участках складирования твердых бытовых отходов: анализ. обзор. Новосибирск: ГПНТБ СО РАН; ИГЭ РАН, 2005. 100 с.
7. Путилина В.С., Галицкая И.В., Юганова Т.И. Адсорбция тяжелых металлов почвами и горными породами. Характеристики сорбента, условия, параметры и механизмы адсорбции: анализ. обзор. Новосибирск: ГПНТБ СО РАН; ИГЭ РАН ГПНТБ СО РАН, 2009. 155 с.
8. Слюсарь Н.Н., Вайсман Я.И., Коротаев В.Н. Оценка долгосрочных эмиссий объектов захоронения твердых коммунальных отходов: результаты полевых исследований и лабораторного моделирования // Экология и промышленность России. 2016. Т. 20. № 4. С. 32–39.
9. Bozkurt S., Moreno L., Neretnieks I. Long-term processes in waste deposits // The Science of the Total Environment. 2000. V. 250. № 1–3. P. 101–121.
10. Christensen T.H., Kjeldsen P. Landfill emissions and environmental impact: An introduction // SARDINIA'95, Proc. Fifth International Landfill Symposium. V. III. Christensen T.H., Cossu R., Stegmann R., Eds. CISA, Cagliari, Italy, 1995.
11. Gounaris V., Anderson P.R., Holsen T.M. Characteristics and environmental significance of colloids in landfill leachate // Environmental Science & Technology. 1993. V. 27. P. 1381.
12. Jensen D.L., Christensen T.H. Colloidal and dissolved metals in leachates from four Danish landfills // Water Research. 1999. V. 33. № 9. P. 2139–2147.
13. Kjeldsen P., Barlaz M.A., Rooker A.P., Baun A., et al. Present and long-term composition of MSW landfill leachate: A Review // Critical Reviews in Environmental Science & Technology. 2002. V. 32. № 4. P. 297–336.
14. Klein T., Niessner R. Characterization of heavy-metal-containing seepage water colloids by flow FFF, ultrafiltration, ELISA and AAS // Mikrochimica Acta. 1998. V. 129. № 1–2. P. 47–55.
15. Lyngkilde J., Christensen T.H. Redox zones of a landfill leachate pollution plume (Vejen, Denmark) // Journal of Contaminant Hydrology. 1992. V. 10. P. 273–289.
16. Pedersen J.K., Bjerg P.L., Christensen T.H., Correlation of nitrate profiles with groundwater and sediment characteristics in a shallow sandy aquifer // J. Hydrol., 1991. V. 124. Is. 3–4. P. 263–277.

ASSESSMENT OF MSW LANDFILL STATE FOR SUBSTANTIATION OF MONITORING IN POST-REHABILITATION PERIOD

I. V. Galitskaya^{a,#}, V. S. Putilina^{a,##}, and I. A. Kostikova^{a,###}^a *Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences, Ulanskii per. 13, bld. 2, Moscow, 101000 Russia*# *E-mail: galgeoenv@mail.ru*## *E-mail: vputilina@yandex.ru*### *E-mail: kostiran@yandex.ru*

By the example of a rehabilitated MSW landfill, an attempt was made to substantiate the importance of engineering geological and engineering ecological survey for obtaining data on the current hydrogeochemical situation and its probable changes in future in order to select rehabilitation measures and monitoring programs in the post-rehabilitation period. The MSW landfill “Dubna Pravoberezhnaya” was chosen as the object of research. The results of studying the chemical composition and contamination of filtrate, groundwater and soils at the test site are presented. An approach to assess the state of landfill body and groundwater upon lacking data is considered. Based on the field and calculation results obtained, the stages of landfill body decomposition at the time of the study were determined, i.e., the stage of acetogenesis, in some areas, and the stage of active methanogenesis, in others. The features of chloride ion, heavy metals, and nitrogen compounds behavior in groundwater were analyzed. The contamination level of the surface soil layer is analyzed, the main geochemical associations of heavy metals are determined, and the soil hazard as a secondary source of groundwater pollution is assessed. The results of the assessment of the landfill body and groundwater state

proved the need to compile a more complete and representative list of indicators and components for a reliable representation of the current situation in the territory of MSW landfills.

Keywords: *municipal solid waste, landfill, groundwater contamination, rehabilitation, managing decisions*

REFERENCES

- Galitskaya, I.V., Putilina, V.S., Yuganova, T.I. *Formirovaniye zonal'nosti okislitel'no-vosstanovitel'nykh sostoyanii v vodonosnykh gorizontakh pod vliyaniem poligonov i svalok TBO* [Formation of zonality of redox states in aquifers under the influence of landfills and landfills of solid waste]. *Geoekologiya*, 2008, no. 5, pp. 401–410. (in Russian)
- Galitskaya, I.V., Kostikova, I.A. *Izuchenie zagryaznennykh gruntov kak vtorichnogi istochnika zagryazneniya na territoriyakh razmeshcheniya poligonov TKO* [The study of contaminated soils as a secondary source of pollution in the territories of MSW landfills]. Proc. Sci. Conf. Sergeev readings. Fundamental and applied issues of modern soil science. Moscow, Geoinfo Publ., 2022, issue 23, pp. 348–354. (in Russian)
- Glushankova, I.S. *Modelirovaniye sostava fil'tratsionnykh poligonov zakhoroneniya tverdykh bytovykh otkhodov* [Modeling the composition of filtration landfills for solid municipal waste disposal]. *Geoekologiya*, 2004, no. 4, pp. 334–341. (in Russian)
- Glushkova, M.V., Galitskaya, I.V. *K voprosy vybora fonovykh znachenii pri otsenke urovnya khimicheskogo zagryazneniya gruntov na territoriyakh gorodskikh svalok* [About choosing background values when assessing the level of chemical contamination of soils in urban landfills]. Proc. Sci. Conf. Sergeev readings, Moscow, GEOS Publ., 2003, issue 5, pp. 237–241. (in Russian)
- Krainov, S.R., Shvets, V.M. *Gidrogeokhimiya* [Hydrogeochemistry]. Moscow, Publ. Nedra, 1992, 463 p. (in Russian)
- Putilina, V.S., Galitskaya, I.V., Yuganova, T.I. *Vliyaniye organicheskogo veshchestva na migratsiyu tyazhelykh metallov na uchastkakh skladirovanoya tverdykh bytovykh orkhodov* [The influence of organic matter on the migration of heavy metals in the MSW storage areas: the analytic review]. Novosibirsk, GPNTB SB RAS, IGE RAS, 2005, 100 p. (in Russian)
- Putilina, V.S., Galitskaya, I.V., Yuganova, T.I. *Adsorbtsiya tyazhelykh metallov pochvami i gornymi porodami. Kharakteristiki sorbenta, usloviya, parametry i mekhanizmy adsorbtsii: analiticheskii obzor* [Adsorption of heavy metals by soils and rocks. Sorbent characteristics, conditions, parameters and adsorption mechanisms: the analytic review]. Novosibirsk, GPNTB SB RAS; IGE RAS; GPNTB SB RAS, 2009, 155 p. (in Russian)
- Slyusar, N.N., Vaisman, Ya.I., Korotaev V.N. *Otsenka dolgosrochnykh emissii ob'ektov zakhoroneniya tverdykh kommunal'nykh otkhodov: rezul'taty polevykh issledovaniy i laboratornogo modelirovaniya* [Assessment of long-term emissions of municipal solid waste disposal facilities: results of field research and laboratory modeling]. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*, 2016, vol. 20, no. 4, pp. 32–39. (in Russian)
- Bozkurt, S., Moreno, L., Neretnieks, I. Long-term processes in waste deposits. *The science of the total environment*, 2000, vol. 250, no. 1–3, pp. 101–121.
- Christensen, T.H., Kjeldsen, P. Landfill emissions and environmental impact: an introduction. SARDINIA'95, Proc. Fifth International Landfill Symposium, Christensen T.H., Cossu R., Stegmann R., Eds., CISA, Cagliari, Italy, 1995, vol. III.
- Gounaris, V., Anderson, P.R., Holsen, T.M. Characteristics and environmental significance of colloids in landfill leachate. *Environmental science & technology*, 1993, vol. 27, pp. 1381.
- Jensen, D.L., Christensen, T.H. Colloidal and dissolved metals in leachates from four Danish landfills. *Water research*, 1999, vol. 33, no. 9, pp. 2139–2147.
- Kjeldsen, P., Barlaz, M.A., Rooker, A.P., Baun, A., et al. 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.
- Klein, T., Niessner, R. Characterization of heavy-metal-containing seepage water colloids by flow FFF, ultrafiltration, ELISA and AAS. *Mikrochimica Acta*, 1998, vol. 129, nos. 1–2, pp. 47–55.
- Lyngkilde, J., Christensen T.H. Redox zones of a landfill leachate pollution plume (Vejen, Denmark). *J. of Contaminant Hydrology*, 1992, vol. 10, pp. 273–289.
- Pedersen, J.K., Bjerg, P.L., Christensen, T.H. Correlation of nitrate profiles with groundwater and sediment characteristics in a shallow sandy aquifer. *J. Hydrol.*, 1991, vol. 124, nos. 3–4, pp. 263–277.

УТИЛИЗАЦИЯ И ЗАХОРОНЕНИЕ ОТХОДОВ

УДК 504.4:57.045

ВЛИЯНИЕ НАВОДНЕНИЯ 2019 г. НА АБИОТИЧЕСКУЮ И БИОТИЧЕСКУЮ СТРУКТУРУ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ И ПОЧВ ПОЙМЫ р. АМУР© 2022 г. Л. А. Гаретова^{1,*}, Г. В. Харитонов¹, Е. Л. Имранова¹, Н. К. Фишер¹, О. А. Кириенко¹¹ *Институт водных и экологических проблем ДВО РАН,
ул. Дикопольцева, 56, Хабаровск, 680000 Россия***E-mail: micro@iver.as.khb.ru*

Поступила в редакцию 18.07.2022 г.

После доработки 22.07.2022 г.

Принята к публикации 02.08.2022 г.

Приведены данные по физико-химическим характеристикам, гранулометрическому и пигментному составу, структуре микробных сообществ донных отложений и почв зоны наводнения в пойме р. Красная речка (малый приток р. Амур). Наиболее существенное перераспределение фракций в гранулометрическом составе донных отложений и почв после схода воды выявлено в зоне смешения вод Амурской протоки и малого притока: содержание фракции 10–50 мкм в осадках увеличилось до 59.8, в почве до 56.1%. Увеличение доли мелкой фракции в составе почвы сопровождалось увеличением содержания $C_{орг}$, а в донных отложениях – возрастанием количества углеводов, по сравнению с периодом до наводнения. Переувлажнение почвы после паводка сопровождалось 2–5 кратным увеличением концентраций фитопигментов. Изменение структуры микробных сообществ донных осадков и почв обусловлено синергическим воздействием наводнения и загрязнения сточными водами. По сравнению с допаводковым периодом численность гетеротрофных бактерий в донных отложениях увеличивалась от 17 до 90 раз, в почве до 10 раз. Длительное (около 3 мес.) затопление способствовало созданию восстановительных условий в почвах, результатом чего явились расширение спектра идентифицированных летучих органических соединений и увеличение их содержания до 10 раз.

Ключевые слова: наводнение, почвы, донные отложения, гранулометрический состав, органическое вещество, углеводороды, летучие органические соединения, фитопигменты, микроорганизмы

DOI: 10.31857/S0869780922050046

ВВЕДЕНИЕ

Наводнения являются одними из самых разрушительных природных явлений. В результате действия различных факторов и процессов они происходят на всех континентах земного шара и по прогнозам будут оказывать все большее влияние на изменение климата [1, 19]. Несмотря на то что ежегодно от наводнений страдают тысячи людей, а убытки достигают десятков миллиардов долларов, учету самих наводнений и анализу их последствий внимания уделяется недостаточно. Затопление территорий в зависимости от временного и пространственного характера наводнений может изменить существующий ландшафт, состав и структуру как абиотических, так и биотических его компонентов. Наиболее существенными факторами воздействия наводнений на ландшафты являются глубина затопления и скорость потока.

Амур – одна из крупнейших рек не только на Дальнем Востоке, но и в мире. Длина реки со-

ставляет 2824 км, площадь бассейна 1856 тыс. км². Участок Амура в районе г. Хабаровск характеризуется обилием протоков и малых притоков, которые впадают как в основное русло, так и в протоки, крупнейшими из которых являются Амурская и Пензенская. Согласно многолетним наблюдениям, катастрофические паводки в бассейне р. Амур происходят каждые 20–30 лет. Текущее десятилетие выпадает из этой статистики. За последние 8 лет большие наводнения случились в 2013, 2019, 2020 и 2021 г. В результате наводнения 2013 г. уровень Амура у Благовещенска достиг 822 см, у Хабаровска 808 см, в Комсомольске-на-Амуре 910 см, что имело катастрофические последствия. Общий ущерб от наводнения составил 527 млрд руб.

Второе по масштабности после паводков 2013 г. за всю историю гидрологических измерений наводнение 2019 г. имело ряд особенностей. В предпаводочный период на реках Амур и Уссури преобладала пониженная водность. Однако

после выпадения интенсивных осадков в июне-июле (100–150%, местами до 300% месячной нормы) на территории Приамурья водность рек значительно повысилась. Во второй декаде августа в результате влияния тропических циклонов с сильными продолжительными дождями (50–90 мм/сут) в бассейнах рек Усури и Сунгари паводок принял затяжной характер. Уровень воды у г. Хабаровск на 1 сентября превысил отметку уровня 635 см, а в первой декаде сентября на паводковую обстановку повлиял экс-тайфун LINGLING, принесший сильные ливни с интенсивностью 50 мм/сут. Паводок категории опасного явления на р. Амур (максимальный уровень 644 см), который длился около 3 мес., закончился 15 октября. Ущерб от паводка в Хабаровском крае составил около 2 млрд руб.

Во время наводнений качество воды в реках закономерно ухудшается, и это ухудшение тем существеннее, чем сильнее проявления антропогенных нарушений на водосборной территории [7]. Исследование качества воды р. Амур [5] выявило существенное превышение допустимых концентраций тяжелых металлов. Так, нормы свинца были превышены почти в 17 раз. Содержание соединений молибдена, марганца, меди и цинка в воде превышало ПДК от 2 до 8 раз. Кроме этого, с прохождением волны паводка связано и увеличение содержания соединений азота вследствие аварийного сброса неочищенных сточных вод, в том числе в протоку Амурскую. Зафиксированное увеличение химического потребления кислорода связано с попаданием в Амур трудно разлагаемых органических веществ (ОВ), таких как нефтепродукты, масла и жиры.

Для оценки экологического состояния природных территорий и влияния на него природных и антропогенных процессов (наводнений в том числе) большое значение имеют исследования их тонкодисперсных компонентов в пойменных почвах и речных донных отложениях (ДО) [14]. Последние вследствие большой удельной поверхности и особенностей кристаллохимии минералов определяют процессы обмена с внешней средой, основу которых в значительной степени составляет их взаимодействие с водой. Наиболее динамичны эти взаимодействия в зоне современного седиментогенеза (пойменные почвы, наилки, ДО и взвеси рек и озер). Гранулометрический состав почв и ДО – один из основных параметров, характеризующих процессы седиментации и динамику водной среды в период наводнений. Он оказывает влияние на ОВ, физико-механические, окислительно-восстановительные условия, плотностную способность, структурное состояние почв и ДО [17]. Геохимические исследования наводнений на Амуре в основном касались распределения тяжелых металлов в почвах, воде и донных отложениях [8, 9]. Влияние наводнений

на структуру и отклик биотических компонентов ДО и почв на длительное затопление до настоящего времени не исследовалось.

Микроводоросли и микроорганизмы играют важную роль в экосистемных процессах и являются неотъемлемой частью биоценозов ДО и почв. Органическое вещество водорослей отличается легкой усвояемостью и дает высокий энергетический эффект, благодаря чему его используют многие гетеротрофные микроорганизмы. Микробные сообщества быстрее, чем сообщества растений, реагируют на изменение условий окружающей среды [21]. Они управляют биогеохимическими циклами Земли [20], влияя на продуктивность и динамику растительных сообществ [23], а также участвуют в процессах восстановления экосистем при различных видах воздействия. Зачастую текущие угрозы для почвенных сообществ являются следствием различных нарушений, которые действуют синергически. В качестве усугубляющего фактора при наводнениях действует аварийный сброс промышленных и бытовых вод без очистки.

Цель работы – исследование гранулометрического состава, органического вещества и связанных с ними биотических компонентов (фитопигменты, микроорганизмы) в ДО и почвах зоны затопления малого притока р. Амур (р. Красная речка).

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Район исследования расположен в южной части г. Хабаровск (рис. 1) на правом берегу Амурской протоки, в период 8.08–15.10.2019 г. он находился в зоне затопления. Район был условно разделен на три участка: верхний участок – зона преимущественного влияния вод р. Красная речка и ее заключенного в коллектор безымянного притока, являющегося приемником сточных вод (1); средний участок – зона смешения вод Амурской протоки и р. Красная речка (2); нижний участок – зона преимущественного влияния вод Амурской протоки (3). Амурская протока является самой крупной в районе Хабаровского водного узла и впадает в основное русло Амура в районе Утеса г. Хабаровск.

Истоки и участки верхнего течения и левых притоков р. Красная речка находятся за пределами городской черты в предгорьях хр. Малый Хецир, на городской территории речка дренирует аккумулятивные поверхности приамурских террас. Территория представлена промышленными предприятиями и жилыми массивами. Почвы водосбора р. Красная Речка представлены в предгорной части буроземами (слабо- и сильно нарушенными) на суглинисто-щебнистых элювиально-делювиальных отложениях склонов. Поверхность



Рис. 1. Карта-схема района исследования.

низкой приамурской террасы с комплексом природных буро-отбеленных оглеенных и гидроморфных луговых глеевых почв перекрыта различными техногенными грунтами, на которых сформированы урботехноземы [10].

Пробы ДО и почв отбирали до и после наводнения 1 августа и 18 октября соответственно. Точки отбора проб сверяли по JPS-навигатору. Пробы почв отбирали методом “конверта” на глубину

0–20 см согласно ГОСТу 17.4.4.02-2017¹. Пробы донных отложений (слой 0–10 см) отбирали пробоотборником “Burkle”. Для гранулометрического анализа высушенные до воздушно-сухого состояния средние пробы ДО и почв измельчали

¹ ГОСТ 17.4.4.02-2017 Охрана природы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического и гельминтологического анализа: Охрана природы. М.: Стандартинформ, 2018. 10 с.

при помощи пестика с резиновым наконечником и просеивали через сито с размером ячеек 2 мм. Распределение частиц в подготовленной пробе изучали методом лазерной дифракции на приборе Shimadzu SALD-2300 (Япония). В водной вытяжке из проб почв и ДО (в соотношении 1 : 5) определяли рН, минерализацию (М) при помощи измерителя комбинированного Seven Multi S-47k, Mettler-Toledo (Швейцария). Содержание органического вещества (ОВ) оценивали по потерям при прокаливании (ППП, $T = +550^{\circ}\text{C}$)².

Определение массовой доли углеводов (УВ) выполняли по методике ПНД Ф 16.1:2.2.22–98³. Измерения проводили на концентратометре КН-2М (Сибэксприбор, Россия). Анализ летучих органических соединений (ЛОС) проводили методом паровозного анализа в сочетании с газовой хроматографией на хроматографе Кристалл-5000.1, детектор пламенно-ионизационный, капиллярная колонка HP FFAP 50 м × 0.32 мм × 0.32 мкм, при температуре от 50 до 200^{4,5}. Идентификация компонентов ЛОС осуществлялась программой Хроматек-аналитик 2.5 версия 2.5.8.0 ЗАО СКБ “Хроматек” 1995–2005. Хроматографические анализы выполняли в ЦКП ИВЭП “Центр экологического мониторинга” (аналитик Г.М. Филиппова).

Фотосинтетические пигменты определяли согласно ГОСТу 17.1.4.02-90⁶, в вариации применительно к ДО [13] с использованием спектрофотометра Shimadzu UVmini-1240 (Япония). Численность эколого-трофических групп микроорганизмов в почве и ДО определяли общепринятыми в почвенной микробиологии методами [11].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Физико-химические параметры почв и донных отложений

Отличия в состоянии почвенного покрова территории, подверженной длительному (в течение

² ГОСТ 26213-91. Почвы. Методы определения органического вещества. М.: ИПК. Изд-во стандартов, 1991. 8 с.

³ ПНД Ф 16.1:2.2.22–98. Количественный химический анализ почв. Методика выполнения измерений массовой доли нефтепродуктов в минеральных, органоминеральных, органико-минеральных почвах и донных отложениях методом ИК-спектрометрии. М.: Гос. ком. РФ по охране окружающей среды, 2005. 21 с.

⁴ ПНД Ф 14.1:2:4.201-03. Методика выполнения измерений массовой концентрации ацетона и метанола в пробах питьевых, природных и сточных вод газохроматографическим методом. М.: ФГУ Центр экологического контроля и анализа, 2010. 16 с.

⁵ ПНД Ф 14.1:2:4.57-96. Количественный химический анализ вод. Методика выполнения измерений массовых концентраций ароматических углеводов в питьевых, природных и сточных водах газохроматографическим методом. М.: ФГБУ ФЦАО, 2017. 18 с.

⁶ ГОСТ 17.1.4.02-90 Вода. Методика спектрофотометрического определения хлорофилла а. М.: ИПК. Изд-во стандартов, 1990. 14 с.

3 мес.) затоплению, в первую очередь проявлялись визуально: отмирание растительности и образование наносов в виде песка или наилка. Величина рН почвенной вытяжки за период исследования варьировала незначительно от 6.07 до 6.73, при этом наибольшее изменение данного показателя в кислую сторону отмечено в зоне затопления водами Амурской протоки (т. 3п) (табл. 1).

Максимальные величины минерализации почвенной вытяжки отмечались в почве верхнего участка русла р. Красная речка (т. 1п), и после затопления она изменилась незначительно. Минимальная минерализация наблюдалась в т. 3п (40.5 мг/л), а после схода воды она несколько увеличилась. Почва среднего участка р. Красная речка (т. 2п) характеризовалась промежуточными показателями минерализации, и после наводнения она снизилась.

Содержание $C_{\text{орг}}$ в почвах варьировало от 1.37 до 8.92%. В почве верхнего участка (т. 1п) существенных изменений $C_{\text{орг}}$ не выявлено. После затопления в грунте среднего участка (т. 2п) количество $C_{\text{орг}}$ увеличилось до 8.92%, что связано с наносом наилка, обладающего значительными запасами ОВ и биогенных элементов [7]. В почве нижнего участка (т. 3п) $C_{\text{орг}}$ уменьшилось в 4 раза, что, вероятно, обусловлено особенностями рельефа и высокой скоростью течения паводковых вод, способствующих вымыванию ОВ и нанесу песчаных фракций. Содержание УВ изменялось от <0.01 (граница чувствительности прибора) до максимального значения 0.56 мг/г в почве верхнего участка до затопления, что обусловлено стоком с урбанизированной территории. Последнее более чем в 5 раз превышает установленное фоновое содержание УВ в почвах для урбанизированных территорий 0.1 мг/г [12]. После наводнения за счет их вымывания паводковыми водами количество УВ в почвах снизилось.

Донные отложения ручья без названия (т. 1д) представлены илистыми песками, в основном русле – песчанистыми илами. Величина рН водной вытяжки, также как и в почвах незначительно варьировала в пределах 6.19–6.34. Минерализация отложений до наводнения снижалась по продольному профилю реки с 52 до 32 мг/л. После наводнения за счет стока с территории водосбора общей закономерностью являлось увеличение минерализации ДО и выравнивание ее величин до 65–66 мг/л во всех точках отбора (см. табл. 1).

Содержание $C_{\text{орг}}$ в ДО зависело от типа осадка и колебалось до наводнения в пределах 3.57–5.81% при максимальном значении в илах ст. Зд. Минимальное его количество отмечалось в илистых песках ручья без названия, выпадающего в р. Красная речка как до, так и после наводнения. Этот водоток в основном заключен в коллектор и,

Таблица 1. Физико-химические параметры почвы и ДО

№	Место отбора	Дата	Описание места отбора	pH	M, мг/л	УВ, мг/г	C _{орг} , %
Почвы							
1п	Правый берег р. Красная речка в районе моста по пер. Краснореченскому	1.08.19	Высокая густая трава	6.31	105.7	0.56	6.62
		18.10.19	Замытая наилками поверхность, высохшее дно берегового склона	6.39	107.7	0.05	6.53
2п	Левый берег р. Красная речка в районе моста по ул. П.Л. Морозова	1.08.19	Высокая густая трава	6.63	97.9	0.12	5.76
		18.10.19	Отмершая трава, наилок, 5 см	6.10	80.9	0.10	8.92
3п	Левый берег затона	1.08.19	Высокая густая трава	6.73	40.5	0.19	5.53
		18.10.19	Отмершая трава, песок	6.07	51.4	<0.01	1.37
Донные отложения							
1д	Ручей без названия, выход из коллектора	1.08.19	Серый ил с небольшим количеством рыжей глины на поверхности	6.30	51.8	<0.01	3.57
		18.10.19	Серый плотный белесый ил с небольшим количеством песка	6.19	65.3	<0.01	3.68
2д	р. Красная Речка в районе моста по ул. П.Л. Морозова	1.08.19	Песок с глиной и растительными остатками с небольшим количеством глины	6.19	47.6	0.02	4.39
		18.10.19	Жидкий серый ил с небольшим количеством глины и растительных остатков	6.28	65.0	0.12	5.81
3д	р. Красная Речка, затон	1.08.19	Серый ил с глиной, немного растительных остатков	6.26	32.0	<0.01	5.82
		18.10.19	Серый ил с небольшим количеством камней	6.34	65.8	0.13	5.47

по сути, является сборником ливневых вод. Существенное увеличение C_{орг} после паводка отмечалось на среднем участке реки (т. 2д). Вероятно, здесь замедление течения способствовало развитию фитопланктона и, соответственно, обогащению осадков легко окисляемым ОВ. Известно, что органическое вещество в ДО, преимущественно, связано с пелитовой фракцией (менее 10 мкм), что сопоставимо с размером планктонных организмов, участвующих в осадкообразовании [2, 3]. Максимальное содержание УВ в песчаных илах составляло 0.12–0.13 мг/г (средний и нижний участок, после наводнения), что несколько превышает фоновое для илистых осадков значение – 0.1 мг/г [4, 22] и, вероятно, обусловлено поверхностным стоком с близлежащих заводских территорий и дорог.

Гранулометрический состав

Гранулометрический состав почв после наводнения в результате процессов седиментации наносов наилка и песка претерпел изменения, проявление которых связано с гидрологическими условиями участка опробования. Так, в составе

почвы верхнего участка доминировала как до, так и после наводнения фракция 10–50 мкм (табл. 2), составляющая 38 и 44% соответственно. Наиболее существенные изменения гранулометрического состава почвы произошли на среднем участке водосбора (т. 2п), который испытывал влияние смешанных вод Красной речки и протоки Амурская и несомого ими материала. До наводнения в составе почвы доминировали частицы размером 100–250 и 250–500 мкм, в сумме составляющие 65%. После наводнения стали существенно преобладать частицы размером 10–50 мкм, что сопровождалось увеличением содержания C_{орг} в 1.5 раза по сравнению с допаводковым периодом (см. табл. 1). Такое перераспределение гранулометрического состава обусловлено особенностями седиментации взвешенного материала на данном участке в период наводнения. В почве нижнего участка (т. 3п) после наводнения наблюдались снижение содержания мелких фракций 10–50 и 50–100 мкм и увеличение содержания частиц 250–500 мкм. При этом суммарная доля песчаных частиц размером 100–500 мкм увеличилась после наводнения от 75.8 до 82.8%, что

Таблица 2. Гранулометрический состав почв и ДО водосбора р. Красная речка (мкм)

Точка отбора	Дата отбора	<2	2–10	10–50	50–100	100–250	250–500	500–1000
Почва								
1п	1.08.19	3.4	12.6	37.8	18.1	22.7	5.3	0.0
	18.10.19	1.7	9.0	44.4	26.0	19.2	0.1	0.0
2п	1.08.19	0.0	6.6	8.7	10.1	30.3	34.8	9.5
	18.10.19	2.6	15.0	56.1	16.9	9.4	0.0	0.0
3п	1.08.19	0.0	0.4	3.5	8.8	30.4	45.7	11.1
	18.10.19	0.0	0.2	0.0	0.6	30.8	52.0	16.4
Донные отложения								
1д	1.08.19	6.4	27.7	45.7	11.05	9.1	0.1	0.0
	18.10.19	6.5	27.6	45.9	10.7	9.0	0.3	0.0
2д	1.08.19	0	8.4	17.53	17.61	37.8	17.7	1.1
	18.10.19	2.4	13.8	59.8	15.74	8.3	0.0	0.0
3д	1.08.19	4.6	22.6	55.8	13.7	3.3	0.0	0.0
	18.10.19	2.8	14.6	52.6	16.4	13.2	0.5	0.0

обусловлено более высокой скоростью течения паводковых вод Амурской протоки, в результате чего седиментации подвергались более крупные частицы несомого водой материала.

Динамика гранулометрического состава ДО характеризует не только условия аккумуляции наносов и способность их к переносу водным потоком, но и реальные и возможные процессы накопления тех или иных веществ, поступающих с территории водосбора. Известно, что размер частиц <100 мкм – транзитная составляющая речных наносов [15], а в ДО Амурской протоки преобладающей является фракция алевролитов, максимум которой в дифференциальном распределении частиц соответствует размеру 24–27 мкм [16]. Согласно полученным данным (см. табл. 2), отложения Красной речки до наводнения были представлены главным образом частицами размером 10–50 мкм с высокой долей (до 27.7%) частиц 2–10 мкм и долей частиц 50–100 мкм (до 17.61%). Существенных изменений в гранулометрическом составе ДО верхнего участка (т. 1д) после наводнения не выявлено. Доминирующей фракцией были частицы размером 10–50 мкм. Сходная картина наблюдалась в ДО нижнего участка (т. 3д), где содержание указанной фракции составляло 53–56%. Только в ДО среднего участка (т. 2д) выявлено существенное изменение гранулометрического состава после наводнения. Здесь до наводнения преобладающей фракцией были частицы размером 100–250 мкм (38%), а после наводнения доминирующими в составе ДО стали частицы 10–50 мкм, содержание которых увеличилось в 3.4 раза по сравнению с допаводковым периодом. Данный участок русла Красной речки характеризуется значительным изгибом,

что способствует замедлению течения, в результате чего создаются условия для седиментации мелкодисперсного материала. Гранулометрический состав определяет удельную поверхность ДО и, соответственно, влияет на накопление ОБ и процессы его трансформации. Отмечено, что при некотором увеличении содержания ОБ на среднем участке (т. 2д) в ДО в 6 раз увеличилось содержание УВ (см. табл. 1).

Наиболее явно различия в распределении фракций в почвах и ДО среднего участка проявляются в наличии выраженных максимумов на дифференциальных кривых (рис. 2а, б).

Содержание фитопигментов и бактерий

Формирование ОБ определяется многими факторами, в том числе количественным и качественным составом первичных продуцентов. Различные продуценты отличаются по пигментному составу, поэтому для оценки их распределения использовали данные по концентрации отдельных фитопигментов и их суммарному содержанию в почвах и ДО Σ пигм = хл. а + хл. б + хл. с + каротиноиды.

Содержание фитопигментов в почве существенно варьировало – от 4.06 до 42.71 мкг/г, при максимальном количестве в почве среднего участка (т. 2п) после наводнения и минимальном в почве нижнего участка (т. 3п) до наводнения (табл. 3). Общей тенденцией являлось увеличение суммы пигментов в почве после наводнения, что, вероятнее всего, обусловлено переувлажнением почвы, способствующим развитию микроводорослей. В качественном составе также произошли изменения – если в почве верхнего участка (т. 1п)

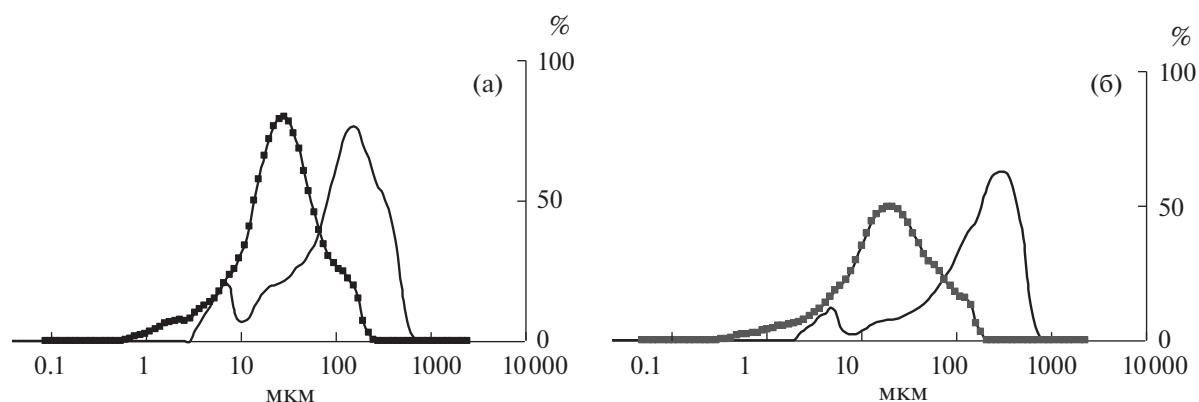


Рис. 2. Гранулометрический состав донных отложений (а) и почвы (б) среднего участка водосбора р. Красная речка: сплошная линия – до наводнения, линия с маркером – после наводнения.

до затопления в небольшом количестве присутствовали только каротиноиды, то после наводнения в составе пигментов появились хлорофиллы, при этом количество хл. *a* было сопоставимо с каротиноидами. Широким пигментным составом отличалась почва среднего участка (т. 2п). Здесь после наводнения содержание хл. *a* увеличилось в 4, а каротиноидов в 2 раза, при преобладании хл. *a*. При этом отношение хл. *a*/кар. = 1.03, что указывает на активно функционирующее сообщество микроводорослей в почве, подверженной затоплению.

В ДО суммарное содержание фитопигментов составляло 4.09–33.71 мкг/г. Максимальное количество было отмечено в ДО на среднем участке (т. 2д), а минимальное – в осадках ручья без названия (т. 1д) после паводка. Общей закономер-

ностью являлось доминирование в составе пигментов каротиноидов – отношение хл. *a*/кар. = 0.23–0.71, что в равной степени характеризует как угнетенное состояние автохтонного фитобентосного сообщества [13], так и наличие в ДО отмершей биомассы растительности. После паводка содержание хл. *a* в осадках верхнего участка (т. 1д) снизилось, а на среднем (т. 2д) и нижнем (т. 3д) участках увеличилось, что может быть обусловлено стимулирующим стоком биогенных элементов в период наводнения. Хлорофилл *b* характерен для наземной растительности, его доля в сумме фитопигментов среднего (т. 2д) и нижнего (т. 3д) участков до и после паводка практически не изменилась и составляла 7.0–8.5 и 12.2–12.7% соответственно. Доля хл. *c*, доминирующего в составе пигментов диатомовых водорослей, в осад-

Таблица 3. Содержание пигментов в почвах и донных отложениях (мкг/г)

Образец	Дата отбора проб	хл. <i>a</i>	хл. <i>b</i>	хл. <i>c</i>	кар.	Сумма	хл. <i>a</i> /кар.
Почвы							
1п	1.08	–	–	–	6.85	6.85	–
	18.10	12.05	4.46	4.06	12.27	32.84	0.98
2п	1.08	4.40	2.78	3.92	9.53	20.63	0.46
	18.10	18.39	4.38	2.13	17.81	42.71	1.03
3п	1.08	–	–	–	4.06	4.06	–
	18.10	4.57	–	4.92	8.11	17.60	0.56
Донные отложения							
1д	1.08	1.60	–	3.11	6.81	11.52	0.23
	18.10	–	–	–	4.09	4.09	–
2д	1.08	5.97	2.03	3.67	12.16	23.83	0.49
	18.10	10.78	2.36	5.39	15.18	33.71	0.71
3д	1.08	4.39	2.78	3.92	10.88	21.97	0.40
	18.10	6.05	2.42	0.36	10.94	19.77	0.55

(–) – не обнаружено.

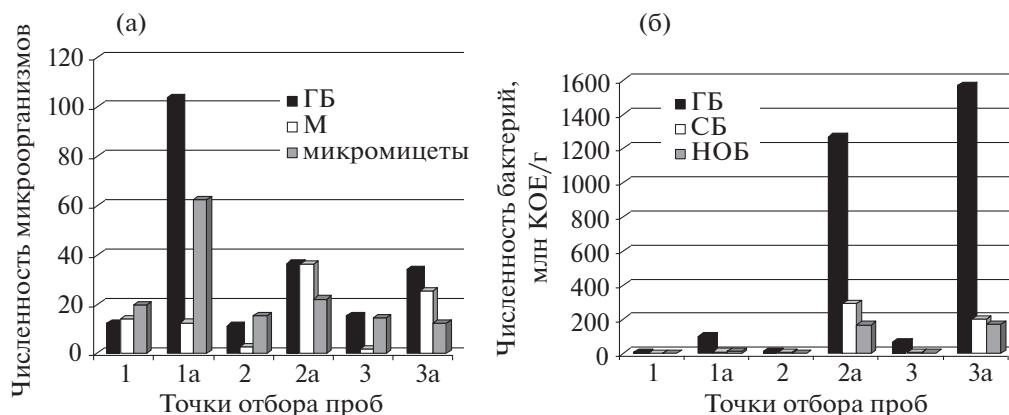


Рис. 3. Численность микроорганизмов: а – в почвах водосбора р. Красная речка: гетеротрофные бактерии (ГБ) и бактерии-минерализаторы (М) в млн КОЕ/г, микромицеты, тыс. КОЕ/г; б – в донных отложениях р. Красная речка: гетеротрофные бактерии (ГБ), сапрофитные бактерии (СБ), нефтеокисляющие бактерии (НОБ). 1, 2, 3 – до наводнения, 1а, 2а, 3а – после наводнения.

ках нижнего участка (т. 3д) после паводка снизилась почти в 10 раз (1.85%). В осадках среднего участка р. Красная речка (т. 2д) доля хл. с в составе фитопигментов практически не изменилась и составляла 15.4–16.0%, что указывает на достаточно активное участие диатомит в продукции ОВ. В целом по описанным признакам существенного влияния паводка на состав фитобентосного сообщества Красной речки не выявлено.

Микробные сообщества участвуют во всем многообразии процессов трансформации ОВ. Они представлены группами микроорганизмов, которые предпочитают те или иные субстраты и/или минеральные компоненты. Подразделение микроорганизмов на соответствующие группы по типам питания достаточно условно, но оно позволяет оценить влияние различных факторов на структуру микробных сообществ. Состав микробного сообщества имеет решающее значение для прогнозирования темпов экосистемных процессов, что, к сожалению, часто игнорируется по сравнению с растительностью [18].

В почвах численность гетеротрофных бактерий (ГБ) варьировала от 12.1 до 103.9 млн КОЕ/г, группы бактерий минерализаторов (М), участвующих на поздних стадиях разложения ОВ, составляла 1.7–36.3 млн КОЕ/г. После затопления прослеживается тенденция к увеличению численности ГБ, бактерий, использующих минеральную форму азота, а также группы микромицетов (рис. 2).

Особенно значимое увеличение численности ГБ (в 8.6 раза) отмечено в почвах верхнего участка, а бактерий минерализаторов в почве среднего и нижнего участка (т. 2п и 3п), где увеличение их численности по сравнению с периодом до затопления составило 14.4–14.5 раза. Численность микромицетов варьировала от 12.34 до 62.35 тыс. КОЕ/г,

при максимальном количестве в почве верхнего участка и минимальном в почве нижнего участка после наводнения. Увеличение численности бактерий, вероятно, обусловлено отмиранием растительности в период наводнения, привнесом в почву азотсодержащих веществ с паводковыми водами, а также развитием микроводорослей в почве после затопления. Известно, что усиление развития водорослей в почве ведет к увеличению численности многих физиологических групп микроорганизмов [6]. Численность нефтеокисляющих бактерий (НОБ) в почве была достаточно велика и составляла от 1.57 до 19.45 млн КОЕ/г при максимальном содержании в почвах верхнего участка (т. 1п) после наводнения. Их доля в сообществе гетеротрофных бактерий составляла от 4.3 до 85.1% при максимуме в почвенном сообществе верхнего участка до наводнения, что обусловлено близостью автомобильной магистрали. После наводнения доля НОБ снизилась вследствие вымывания УВ из почвы.

Содержание летучих органических соединений

При длительном затоплении почв в них создаются восстановительные условия, в результате чего трансформация углеводородных, углеводных и белковых веществ осуществляется анаэробными бактериями с образованием ЛОС. В их число входят кислородсодержащие органические соединения (спирты, альдегиды, эфиры). Класс опасности для большинства данных соединений не установлен, но они обладают большей токсичностью, чем нефть и исходные ОВ. Особенно это касается продуктов трансформации ароматических соединений, обладающих канцерогенными свойствами.

Таблица 4. Содержание летучих органических соединений в почвах

Компоненты, мкг/см ³	Т. 1д		Т. 2д		Т. 3д	
	1.08.19	18.10.19	1.08.19		1.08.19	18.10.19
Гексан	0.0050	0.0122	0.0083	0.0458	—	0.0057
Этилацетат	0.0020	0.0122	0.008	—	—	0.0091
Бензол	0.0005	—	—	0.0340	0.0007	0.0039
Бутанол	—	—	—	0.0720	—	—
Изобутанол	—	—	—	0.0636	—	—
Бутилацетат	—	—	0.0039	0.0047	—	0.0028
Этилбензол	0.0005	—	0.0006	0.0025	0.0005	0.0006
Толуол	0.0021	0.0239	0.0089	0.0728	0.0071	0.0038
Изопропилбензол	0.0003	0.0001	0.001	0.0006	0.0002	0.0003
<i>М</i> -ксилол	0.0008	0.0003	0.0030	0.0037	0.0003	0.0010
<i>П</i> -ксилол	0.0003	—	—	0.0015	—	0.0005
<i>О</i> -ксилол	0.0027	0.0022	0.0014	0.0049	0.0013	0.0013
Сумма ЛОС	0.014	0.051	0.035	0.339	0.010	0.029

(—) – не обнаружено.

Таблица 5. Содержание летучих органических соединений в ДО р. Красная речка

Компоненты, мкг/см ³	Т. 1д		Т. 2д		Т. 3д	
	1.08.19	18.10.19	1.08.19	18.10.19	1.08.19	18.10.19
Гексан	—	—	0.0106	0.0199	0.0019	0.0047
Этилацетат	—	—	0.0075	—	0.0038	0.0155
Бензол	0.0001	0.0001	0.0011	0.0005	0.0003	0.0005
Этилбензол	0.0002	—	—	0.0004	—	—
Толуол	0.0028	0.0002	0.0125	0.0054	0.0008	0.0017
<i>М</i> -ксилол	0.0023	0.0001	0.0006	0.0022	0.0002	0.0006
<i>П</i> -ксилол	0.0001	0.0003	—	—	0.0003	—
<i>О</i> -ксилол	0.0003	0.0002	0.0010	0.0014	0.0007	0.0008
Бутанол	—	—	—	—	0.0022	—
Изопропилбензол	0.0011	—	0.0003	0.0012	0.0002	—
Сумма ЛОС	0.007	0.003	0.034	0.031	0.010	0.024

(—) – не обнаружено.

Результаты анализа ЛОС в нативных почвенных образцах показывают (табл. 4), что после затопления увеличилось их суммарное содержание.

В послепаводковый период максимальное (на порядок) увеличение содержания ЛОС выявлено в почве среднего участка (т. 2п). Изменилось и содержание индивидуальных веществ. Так, содержание гексана и толуола, сопутствующих загрязнению нефтепродуктами, увеличилось более чем на порядок. Во всех образцах присутствовали толуол, изопропилбензол, *м*- и *о*-ксилол. Самый широкий спектр идентифицированных ЛОС выявлен в почвах среднего участка (т. 2п). Большинство ЛОС обладают характерным резким запахом

и высокой токсичностью. Согласно гигиеническим нормативам СанПиН 1.2.3685-21⁷, эти вещества принадлежат к 1–4 классам опасности.

В ДО содержание ЛОС, в целом, было ниже, чем в почвах, существенных изменений в их количестве до паводка и после его прохождения не выявлено (табл. 5). Во всех образцах присутствовали бензол, толуол, *м*- и *о*-ксилол. Наибольшее разнообразие ЛОС выявлено в осадках нижнего участка (ст. 3д) до паводка. По содержанию гексана отличаются осадки среднего участка (т. 2д), где

⁷ СанПиН 1.2.3685-21. “Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания”. 960 с.

его содержание на порядок превышает количество в других образцах ДО. После паводка здесь снизилось содержание бензола, толуола (более чем на порядок), но увеличилось количество *m*-ксилола и изопропилбензола.

ВЫВОДЫ

После длительного (около 3 мес.) нахождения почв под водой их верхний слой подвергся значительной структурной трансформации: на участке замедленного течения верхний слой почвы пополнился наилком, а на участке с высокой скоростью течения произошло отложение песка.

Наиболее существенное перераспределение фракций в составе затопленных почв и ДО в пользу более мелких (10–50 мкм) выявлено в зоне влияния смешанных вод Амурской протоки и р. Красная речка с замедленным течением, создающем условия для осаждения мелкодисперсного материала. Возрастание доли мелкой фракции в составе почвы сопровождалось увеличением содержания $C_{орг}$ и углеводов в донных отложениях по сравнению с допаводковым периодом.

В период наводнения одновременно происходят противоположные процессы: вымывание органических веществ и их аккумуляция в почве и ДО. Напряженность и преобладание того или иного из них зависит от гидрологического режима участка водосбора (уровень и скорость течения воды, период прохождения паводка), а также от количества и качественного состава ОВ в исходных отложениях и водных массах.

В паводок за счет переувлажнения в почвах увеличивается содержание фотосинтетических пигментов, т.е. в балансе ОВ увеличивается роль первичной продукции. Существенного влияния паводка на функционирование фитобентосных сообществ не выявлено. Неравномерность распределения фитопигментов в осадках различных участков обусловлена как сезонными изменениями, так и гранулометрическим составом осадков.

После наводнения, как в почвах, так и ДО, значительно увеличивается численность микроорганизмов, что связано с обогащением данных субстратов отмершим в период затопления растительным материалом и биогенными элементами, поступающими с паводковыми водами.

В процессе затопления в почвах создаются восстановительные условия, способствующие развитию анаэробных микробиологических процессов, в результате увеличивается суммарное содержание летучих органических соединений и их разнообразие.

Авторы выражают благодарность ведущему инженеру Г.М. Филипповой (ЦКП ИВЭП ДВО РАН “Центр экологического мониторинга”) и ведущему научному сотруднику, к.б.н. М.А. Кли-

мину (ИВЭП ДВО РАН) за помощь в выполнении анализов, а также научному сотруднику А.М. Кошелькову (ИГД ДВО РАН) за помощь в отборе проб.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авакян А.Б., Истомина М.Н. Наводнения как глобальная многоаспектная проблема // Вестник РАН. 2002. Т. 72. № 12. С. 1059–1068.
2. Бреховских В.Ф., Казмирук Т.Н., Казмирук В.Д. Донные отложения Ивановского водохранилища. М: Наука, 2006. 176 с.
3. Выхристюк Л.А., Варламова О.Е. Донные отложения и их роль в экосистеме Куйбышевского водохранилища. Тольятти: ИЭВБ РАН, 2003. 174 с.
4. Галимов Э.М., Кодина Л.А., Степанец О.В. Биогеохимия и проблемы радиоактивного загрязнения морей России (на примере Карского моря) // Фундаментальные исследования океанов и морей / Под ред. Н.П. Лаверов. М.: Наука, 2006. Т. 2. С. 440–465.
5. Государственный доклад о состоянии и об охране окружающей среды Хабаровского края в 2019 году / Под ред. А.А. Сабитова. Министерство природных ресурсов Хабаровского края, 2020. 268 с. <https://mpr.khabkrai.ru/?menu=getfile&id=8149&view=1>
6. Джефффри Ч. Биологическая номенклатура. Пер. с англ. Е.Б. Алексеева / Под ред. М.В. Миных. М.: Мир, 1980. 119 с.
7. Истомина М.Н., Кочарян А.Г., Лебедева И.П., Никитская К.Е. Экологические последствия наводнений // Инженерная экология. 2004. № 4. С. 3–19.
8. Махинов А.Н., Лю Шуэуан, Махинова А.Ф., Чаомин Даи. Влияние наводнений и урбанизации на содержание тяжелых металлов в воде и донных отложениях реки Амур // Экология и промышленность России. 2020. Т. 24. № 12. С. 32–38.
9. Махинов А.Н., Махинова А.Ф. Влияние наводнений на геохимические потоки в почвах долины Амура // Успехи современного естествознания. 2017. № 1. С. 58–63.
10. Нарбут Н.А., Антонова Л.А., Матюшкина Л.А., Климина Е.М., Караванов К.П. Стратегия формирования экологического каркаса городской территории (на примере Хабаровска). Владивосток: Хабаровск: ДВО РАН, 2002. 129 с.
11. Практикум по микробиологии: Учеб. пос. для студентов ВУЗов / Под ред. А.И. Нетрусова. М.: Изд. центр “Академия”, 2005. 608 с.
12. Рогозина Е.А. Геохимические изменения в составе нефти при биодegradации // Разведка и охрана недр. 2010. № 4. С. 63–68.
13. Сигарева Л.Е. Хлорофилл в донных отложениях Волжских водоемов. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2012. 217 с.
14. Харитонов Г.В., Остроухов А.В., Тюгай З., Крутикова В.О. Лабильные компоненты донных отложений р. Симми (заповедник “Болоньский”) // Вестник Московского ун-та. Сер. 17. Почвоведение. 2020. № 4. С. 27–34.

15. Чалов Р.С. Русловедение: теория, география и практика. Т. I. Русловые процессы: факторы, механизмы, формы проявления и условия формирования речных русел. М.: Изд-во ЛКИ, 2008. 608 с.
16. Чижикина Н.П., Сиротский С.Е., Харитоновна Г.В., Манучаров А.С. и др. Минералогический и химический состав тонкодисперсной части донных отложений р. Амур // Почвоведение. 2011. № 7. С. 848–860.
17. Шерышева Н.Г., Ракитина Т.А., Поветкина Л.П. Условия формирования гранулометрического состава иловых отложений на территории национального парка “Самарская лука” // Самарская Лука: проблемы региональной и глобальной экологии. Самарская Лука. 2009. Т. 18. № 3. С. 104–113.
18. Allison S.D., Martiny J.B.H. Resistance, resilience, and redundancy in microbial communities // Proc. of the National Academy of Sciences of the United States of America. 2008. V. 105. P. 11512–11519.
19. Bapiri A., Bååth E., Rousk J. Drying-rewetting cycles affect fungal and bacterial growth differently in an arable soil // Microbial ecology. 2010. V. 60. № 2. P. 419–428.
20. Griffiths B.S., Philippot L. Insights into the resistance and resilience of the soil microbial community // FEMS Microbiology Reviews. 2013. V. 37. P. 112–129.
21. Harris J.A. Soil microbial communities and restoration ecology: facilitators or followers? // Science. 2009. V. 325. № 5940. P. 573–574.
22. Tolosa I., Mora S., Sheikholeslami M.R., Villeneuve J.P. et al. Aliphatic and Aromatic Hydrocarbons in coastal Caspian Sea sediments // Marine Pollution Bulletin. 2004. V. 48. P. 44–60.
23. Van der Heijden M.G.A., Bardgett R.D., Van Straalen N.M. The unseen majority: soil microbes as drivers of plant diversity and productivity in terrestrial ecosystems // Ecology Letters. 2008. V. 11. № 3. P. 296–310.

THE IMPACT OF THE 2019 FLOOD ON THE ABIOTIC AND BIOTIC STRUCTURE OF BOTTOM SEDIMENTS AND SOILS IN THE AMUR RIVER FLOODPLAIN

L. A. Garetova^{a,#}, G. V. Kharitonova^a, E. L. Imranova^a, N. K. Fisher^a, and O. A. Kirienko^a

^a Institute of Water and Ecological Problems, Far East Branch, Russian Academy of Sciences,
ul. Dikopol'tseva, 56, Khabarovsk, 680000 Russia

[#]E-mail: micro@ivep.as.khb.ru

Large and catastrophic floods occur every 20–30 years in the Amur River basin. The current decade is characterized by an extremely high frequency of recurrence of large floods and prolonged (up to three months or more) flooding in the floodplain (2013, 2019–2021). Unfortunately, insufficient attention is paid to the analysis of the consequences of flood impact on individual components of ecosystems. This is especially true for the study of changes in the abiotic and biotic structure of edaphic components of ecosystems (bottom sediments and soils) during prolonged flooding. In this work, we have analyzed and assessed changes in the content of organic matter, hydrocarbons and volatile organic compounds, particle-size distribution and pigment composition, structure of microbial communities in bottom sediments (BS) and floodplain soils after the 2019 flood. Samples of BS and soils were taken in 3 areas of the floodplain of the Amur River channel, including the mouth area of a small tributary of the Krasnaya Rechka River, before the flood and after the flood (August 1 and October 18, respectively). The coordinates of sampling points were verified using the JPS navigator. The study of the granulometric composition of samples by laser diffraction (Shimadzu-2300, Japan) revealed the features of particle-size distribution in the composition of BS and soils after prolonged flooding (about 3 months). It is shown that in the mixing zone of the waters of the Amurskaya branch and the Krasnaya Rechka, after the water drained, the content of the most representative fraction of suspended sediments of the Amurskaya branch (10–50 μm) in the surface layer of BS and soils (0–20 cm) increased significantly and amounted to more than 50% (59.8 and 56.1%, respectively), which is due to the deposition of substantial amount of silt. It was accompanied by an increase in the content of C_{org}; in addition, the amount of hydrocarbons in BS increased in comparison with the pre-flood period. Analysis of the structure and abundance of the biotic community (ecological and trophic groups of microorganisms, phytopigments) showed that soil flooding during the flood led to an increase in the total content of phytopigments (up to 5 times) and the proportion of carotenoids in their composition. The change in the structure of microbial communities in BS and soils is due to the synergistic effect of flooding and pollution by emergency sewage. Compared with the pre-flood period, the number of heterotrophic bacteria in soils increased up to 10 times, in bottom sediments up to 90 times. The study of the qualitative composition of volatile organic compounds by vapor-phase analysis in combination with gas chromatography showed that prolonged flooding contributed to the creation of reducing conditions in soils, resulting in an expansion of the spectrum of identified volatile organic compounds and an increase in their content up to 10 times compared with the pre-flood period.

Keywords: flood, soil, bottom sediments, particle-size distribution, organic matter, hydrocarbons, phytopigments, microorganisms, volatile organic substances

REFERENCES

1. Avakyan, A.B., Istomina, M.N. *Navodneniya kak global'naya mnogoaspekt'naya problema* [Floods as a global multidimensional problem]. *Vestnik RAN*, 2002, vol. 72, no. 12, pp. 1059–1068. (in Russian)
2. Brekhovskikh, V.F., Kazmiruk, T.N., Kazmiruk, V.D. *Donnye otlozheniya Ivan'kovskogo vodokhranilishcha* [The bottom sediments of the Ivan'kovo water reservoir]. Moscow, Nauka Publ., 2006, 176 p. (in Russian)
3. Vykhristyuk, L.A., Varlamova, O.E. *Donnye otlozheniya i ikh rol' v ekosisteme Kuibyshevskogo vodokhranilishcha* [Bottom sediments and their role in the ecosystem of Kuibyshev water reservoir]. Togliatti, IEVB RAS Publ., 2003, 174 p. (in Russian)
4. Galimov, E.M., Kodina, L.A., Stepanets, O.V. *Biogekhimiya i problem radioaktivnogo zagryazneniya morei Rossii (na primere Karskogo moraya)* [Biogeochemistry and problems of radioactive contamination of the Russian seas (by the example of the Kara Sea). *Fundamental'nye issledovaniya okeanov i morei* [Fundamental research of oceans and seas]. Laverov, N.P., Ed., Moscow, Nauka Publ., 2006, vol. 2, pp. 440–465. (in Russian)
5. *Gosudarstvennyi doklad o sostoyanii i ob okhrane okruzhayushchei sredy Khabarovskogo kraya v 2019 godu* [State report on the state and environmental protection of the Khabarovsk Territory in 2019], A.A. Sabitova, Khabarovsk, Ministry of Natural Resources of the Khabarovsk Territory Publ., 2020, 268 p. (in Russian)
6. Jeffrey, Ch. *Biologicheskaya nomenklatura* [Biological nomenclature]. Translated from English, Moscow, Mir Publ., 1980, 119 p. (in Russian)
7. Istomina, M.N., Kocharyan, A.G., Lebedeva, I.P., Nikitskaya, K.E. Environmental impacts of floods. *Inzhenernaya ekologiya*, 2004, no. 4, pp. 3–19. (in Russian)
8. Makhinov, A.N., Liu Shuguang, Makhinova A.F., Chaomin Dai. *Vliyanie navodnenii i urbanizatsii na sodержanie tyazhelykh metallov v vode i donnykh otlozheniyakh reki Amur* [Influence of flooding and urbanization on the content of heavy metals in water and bottom sediments of the Amur River]. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*, 2020, vol. 2, no. 12, pp. 32–38. (in Russian)
9. Makhinov, A.N., Makhinova, A.F. *Vliyanie navodnenii na geokhimicheskie potoki v pochvakh doliny Amura* [Influence of flooding on geochemical fluxes in soils of the Amur River valley]. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*, 2017, no. 1, pp. 58–63. (in Russian)
10. Narbut, N.A., Antonova, L.A., Matyushkina, L.A., Klimina, E.M., Karavanov, K.P. *Strategiya formirovaniya ekologicheskogo karkasa gorodskoi territorii (na primere Khabarovska)*. [Strategy for the formation of the ecological frame of the urban area (by the example of Khabarovsk)]. Vladivostok; Khabarovsk, FEB RAS Publ., 2002, 129 p. (in Russian)
11. *Praktikum po mikrobiologii: ucheb. posobie dlya studentov vuzov* [Practical works in microbiology: textbook for higher school students], A.I. Netrusov, Ed., Moscow, Academiya Publ., 2005, 608 p. (in Russian)
12. Rogozina, E.A. *Geokhimicheskie izmeneniya v sostave nefii pri biodegradatsii* [Geochemical changes in the composition of oil during biodegradation]. *Razvedka i okhrana nedr*, 2010, no. 4, pp. 63–68. (in Russian)
13. Sigareva, L.E. *Khlorofill v donnykh otlozheniyakh Volzhskikh vodoemov* [Chlorophyll in bottom sediments of the Volga River reservoirs]. Moscow, KMK Publ., 2012, 217 p. (in Russian)
14. Kharitonova, G.V., Ostroukhov, A.V., Tyugai, Z., Krutikova, V.O. *Labil'nye komponenty donnykh otlozhenii r.Simmi (zapovednik "Bolon'skii")* [Labile components of bottom sediments of the Simmi River (reserve "Bologna")]. *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 17. Pochvovedeniye*, 2020, no. 4, pp. 27–34. (in Russian)
15. Chalov, R.S. *Ruslovedeniye: teoriya, geografiya i praktika. T. I. Ruslovye protsessy: faktory, mekhanizmy, formy proyavleniya i usloviya formirovaniya rechnykh rusel* [River channel studies: theory, geography and practice. Vol. I. Channel processes: factors, mechanisms, forms of manifestation and conditions of river channel formation]. Moscow, LKI Publ., 2008, 608 p. (in Russian)
16. Chizhikova, N.P., Sirotskii, S.E., Kharitonova, G.V., Manucharov, A.S., Konovalova, N.S., Utkina, E.V. *Mineralogicheskii i khimicheskii sostav tonkodispersnoi chasti donnykh otlozhenii r.Amur* [The mineralogical and chemical composition of the fine-dispersed bottom sediments of the Amur River]. *Pochvovedenie*, 2011, no. 7, pp. 848–860. (in Russian)
17. Sherysheva, N.G., Rakitina, T.A., Povetkina, L.P. *Usloviya formirovaniya granulometricheskogo sostava ilovykh orlozhenii na tterritorii natsional'nogo parka "Samarskaya Luka"* [Conditions of particle-size distribution formation in silt deposits in the Samarskaya Luka National Park]. *Samarskaya Luka: problemy regional'noi i global'noi ekologii* [Samarskaya Luka: issues of regional and global ecology]. Samarskaya Luka, 2009, vol. 18, no. 3, pp. 104–113. (in Russian)
18. Allison, S.D., Martiny, J.B.H. Resistance, resilience, and redundancy in microbial communities. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2008, vol. 105, pp. 11512–11519.
19. Bapiri, A., Bååth, E., Rousk, J. Drying-rewetting cycles affect fungal and bacterial growth differently in an arable soil. *Microbial ecology*, 2010, vol. 60, no. 2, pp. 419–428.
20. Griffiths, B.S., Philippot, L. Insights into the resistance and resilience of the soil microbial community. *FEMS Microbiology Reviews*, 2013, vol. 37, pp. 112–129.
21. Harris, J.A. Soil microbial communities and restoration ecology: facilitators or followers? *Science*, 2009, vol. 325, no. 5940, pp. 573–574.
22. Tolosa, I., Mora, S., Sheikholeslami, M.R., Villeneuve, J.P., Bartocci, J., Cattini, C. Aliphatic and Aromatic Hydrocarbons in coastal Caspian Sea sediments. *Marine Pollution Bulletin*, 2004, vol. 48, pp. 44–60.
23. Van der Heijden, M.G.A., Bardgett, R.D., Van Straalen, N.M. The unseen majority: soil microbes as drivers of plant diversity and productivity in terrestrial ecosystems. *Ecology Letters*, 2008, vol. 11, no. 3, pp. 296–310.

УДК 624.131.4

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ГАЗОНАСЫЩЕННОСТИ ПОРОВЫХ ВОД НА ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СВЯЗНЫХ ДИСПЕРСНЫХ (ГЛИНИСТЫХ) ГРУНТОВ МЕТОДОМ СМЕШИВАНИЯ С ЦЕОЛИТАМИ

© 2022 г. А. А. Кудяев^{1,*}, Ф. С. Карпенко^{2,**}, Д. В. Корост^{1,***}, О. Н. Видищева^{1,****}, М. М. Кучуков^{2,*****}

¹ Геологический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова,
Ленинские горы, 1, Москва, 119234 Россия

² Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН (ИГЭ РАН),
Уланский пер., 13, стр. 2, Москва, 101000 Россия

*E-mail: a.a.kudaev@gmail.com

**E-mail: kafs08@bk.ru

***E-mail: dkorost@mail.ru

****E-mail: vid6877@yandex.ru

*****E-mail: kuchukov.m@gubkin.ru

Поступила в редакцию 04.07.2022 г.

После доработки 29.07.2022 г.

Принята к публикации 01.08.2022 г.

В работе рассмотрен метод пробоподготовки искусственных образцов (пасты) дисперсных глинистых отложений с заданной газонасыщенностью, заключающийся в их смешивании с цеолитом, насыщенным газом. Моделирование газонасыщенности образцов донных отложений, отобранных в районе развития субаквального оползня Красноярский на оз. Байкал, позволило оценить вклад газовой составляющей в изменение их прочностных характеристик. Установлена обратная зависимость между концентрацией свободного “пузырькового” газа в придонных отложениях акватории оз. Байкал и их прочностными характеристиками и структурой пустотного пространства. Предложенный метод позволяет моделировать газонасыщенность изучаемых образцов дисперсных глинистых грунтов с целью изучения изменений их физико-механических свойств и может использоваться при проведении геологоразведочных работ на углеводородное сырье в условиях шельфа, а также при инженерно-геологических изысканиях для оценки несущей способности грунтов при изменении газонасыщенности донных отложений.

Ключевые слова: газонасыщенные грунты, субаквальные грунты, цеолиты, моделирование газонасыщенности, устойчивость склонов, субаквальные оползни, компьютерная томография

DOI: 10.31857/S0869780922050058

ВВЕДЕНИЕ

Газонасыщенные грунты широко распространены в донных отложениях, газ в них чаще всего представлен метаном и находится в условиях гидростатического давления, значительно превышающего атмосферное [26]. Именно с такими грунтами во многих случаях связано развитие субаквальных оползней, но закономерности изменения свойств глинистых грунтов при газонасыщении, а соответственно расчет и моделирование развития и активизации оползневых процессов, в значительной степени остаются слабо изученными. Во многом это обусловлено изменением их строения при извлечении керна на поверхность, в ходе подготовки и проведения ис-

пытаний, что приводит к неопределенности и противоречивости результатов испытаний.

Цель проведения исследований – разработка метода подготовки образцов газонасыщенных глинистых грунтов и определение закономерностей изменения строения и свойств придонных глинистых грунтов в зависимости от их газонасыщенности.

АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА ИЗУЧЕНИЯ ГАЗОНАСЫЩЕННЫХ СУБАКВАЛЬНЫХ ГРУНТОВ

Один из основных параметров содержания газа в донных отложениях – степень насыщения S , равная отношению суммы объема воды и свобод-

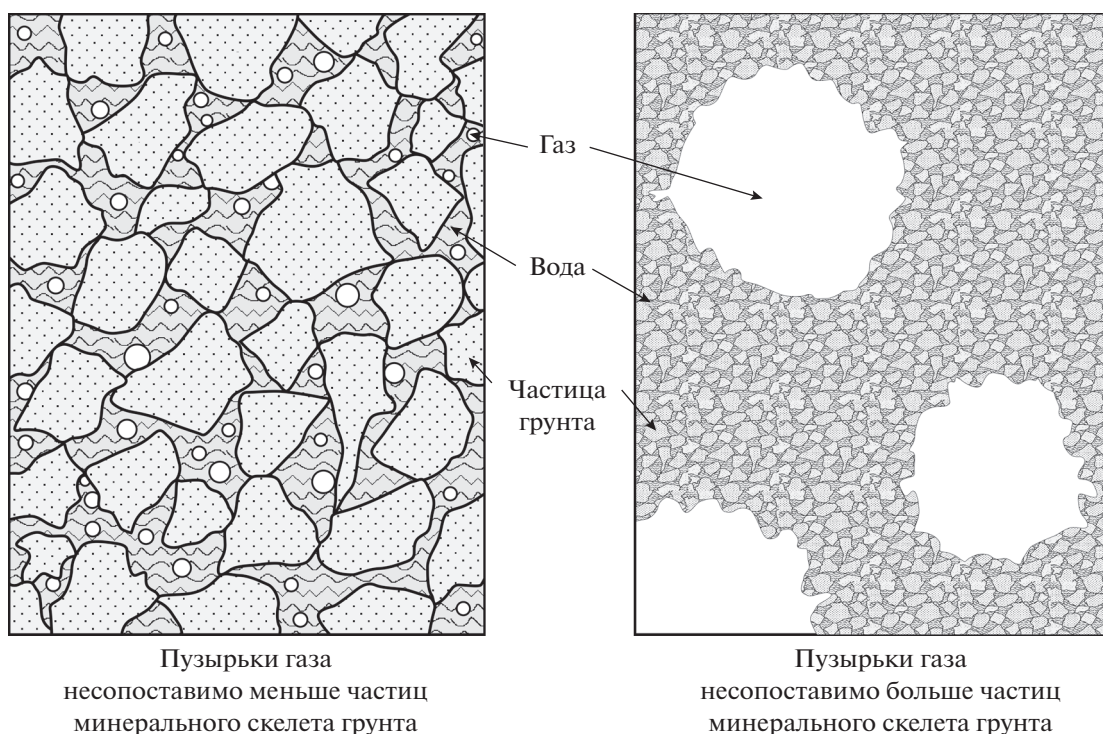


Рис. 1. Схема строения субаквальных грунтов, содержащих газовую компоненту [5].

ного газа к объему пустот в грунте [12]. Степень насыщения субаквальных грунтов газом зависит от давления, оказываемого на грунт водной толщей и вышележащими отложениями. Согласно исследованиям [12] при $S > 90\%$ в субаквальных грунтах могут существовать газы, не только растворенные в воде, но и в свободном состоянии. Большинство исследований газосодержащих отложений направлены на изучение грунтов с насыщением в среднем более 85% [12, 15, 16, 20, 21, 32, 37].

Газ в субаквальных грунтах может находиться в свободном (пузырьки), защемленном (мениски), растворенном состоянии, а также в виде молекул, сорбированных на поверхности минеральных частиц [34]. Хотя газ в растворенной форме сам по себе не влияет на механические свойства грунтов, формирование или диссоциация газовых гидратов и захваченных пузырьков газа могут значительно изменить характеристики грунтов [18, 26]. Состояние нерастворенного газа (пузырькового) в грунте зависит от соотношения давления газа и давления поровых вод, а также от сил поверхностного натяжения на границах раздела фаз и радиуса кривизны менисков (рис. 1).

Газовые включения по свойствам резко отличаются от твердой и жидкой компонент грунтов, а их наличие оказывает влияние на физические [33], механические [16, 34], акустические [9] свойства вмещающих грунтов. Наибольшее влияние на свойства субаквальных грунтов оказывают сво-

бодные и защемленные газы. При этом степень влияния газовых включений на механические свойства грунта зависит от их относительного объема и величины порового давления [36]. Наличие свободных газов в грунте обусловлено поровым давлением, концентрацией газа и коэффициентом его растворимости. Исследования [12] показали, что, в то время как согласно лабораторным экспериментам коэффициент растворимости метана около 0.030, натурные исследования подводных отложений показывают значения, близкие к 0.002.

При понижении давления в поровой воде выделяются газы в виде пузырьков. Аналогичное явление часто возникает при подъеме с глубины водонасыщенных образцов пород при бурении скважин: из-за разницы в них пластового и атмосферного давления начинают бурно выделяться пузырьки растворенных газов. Выделение растворенных и защемленных газов сопровождается ослаблением структурных связей между частицами в грунте и его разупрочнением [6].

Исследованию газонасыщенности донных отложений посвящено множество работ, как методических, так и практических. В методических работах чаще всего рассматриваются способы измерения содержания выделявшегося газа, например: Head-space — метод свободного отделения газа от образца грунта [1]; метод извлечения газа при помещении образца в вакуум [14]; выделение окклюдированного газа — перемешиванием об-

разца грунта в шаровой мельнице [11] или в кухонном блендере [29], а также с помощью шейкера [31, 37]; выделение газа, адсорбированного в молекулярной структуре минерального скелета, — извлечение путем разложения кристаллической решетки глинистых минералов горячей фосфорной кислотой [13, 14].

Практические работы посвящены, как правило, картированию газонасыщенности отложений в акваториях и дальнейшей интерпретации данных [7, 31, 38]. В последнее время наибольший интерес представляют исследования осадочных отложений, включающих в себя включения газовых гидратов [10, 24, 39, 40], и непосредственно самих природных газовых гидратов.

Отдельные теоретические модели, описывающие поведение газонасыщенных дисперсных грунтов, представляющие наибольший интерес, рассмотрены в данной работе.

В [35] С. Уиллер (S.J. Wheeler) предложил методику оценки сопротивления грунтов недренному сдвигу. Выведенные в его работе теоретические кривые ограничивают диапазон значений прочности, которые могут быть выше, равны или ниже, чем прочность при предельном насыщении грунта газом. Хотя эти верхние и нижние граничные значения могут быть применены для оценки, эта модель не позволяет получить количественных параметров значения прочности. S.D. Thomas [30] охарактеризовал модель, которая дает простое описание поведения уплотнения газонасыщенных грунтов, но также не позволяет оценить величину их прочности.

Соотношения, предложенные S. Pietruszczak и G.N. Pande [22], позволяют получить количественный прогноз сопротивления грунтов недренному сдвигу; однако результаты их модели не были подтверждены лабораторными испытаниями. Позднее S. Pietruszczak и соавт. [23] для проверки своей модели опробовали экспериментальную программу на частично насыщенном песке Оттавы (хорошо сортированный кварцевый песок, вода, воздушная смесь). Прогнозные модели соответствовали наблюдаемому экспериментальному поведению грунта.

Разработке методики количественного прогноза величины прочности на недренный сдвиг газонасыщенных грунтов и улучшению модели, описывающей реакцию взаимодействия разного количества насыщенного газа в глинистых грунтах на растворимость газа и сжимаемость газовой фазы, посвящена работа J.L. Grozic [16]. Эта модель рассматривает основные прочностные характеристики грунта как постоянные (отсутствие деформаций в грунте) во время процессов расширения газа. Теоретическая модель предсказывает увеличение прочности при недренном сдвиге с уменьшением газонасы-

щенности из-за сжатия поровых флюидов. Модель учитывает влияние концентрации газа, напряжения консолидации, объемного коэффициента растворимости газа и объема пустот грунта на сопротивление недренному сдвигу как для газонасыщенных, так и водонасыщенных грунтов.

Устойчивость склоновых отложений в связи с их газонасыщенностью изучалась и отечественными исследователями. В частности, устойчивость газонасыщенных отложений рассмотрена на примере верхней части разреза Баренцево-Карского шельфа С.И. Рокосом [4]. По его мнению, наличие в грунтах скоплений газа с избыточным пластовым давлением оказывает влияние на напряженное состояние грунтового массива, снижая литостатическое (бытовое) давление в нем, что может оказывать существенное влияние на расчетные оценки осадки фундаментов инженерных сооружений. Для полной и точной оценки напряженного состояния газонасыщенных грунтовых толщ представляется необходимым проводить измерения естественного порового (пластового) давления *in situ* [4].

Обобщенный анализ реакции газонасыщенных грунтов на действие сдвиговых нагрузок, проведенный по имеющимся литературным данным, представлен на рис. 2.

В целом анализ результатов исследований газонасыщенных дисперсных грунтов показывает, что современные теоретические представления об их строении и свойствах носят во многом эмпирический характер и не могут в полной мере качественно описать и количественно охарактеризовать влияние газов на их прочность.

Газонасыщенные грунты имеют более сложное строение по сравнению с двухкомпонентными грунтами, в составе которых газовая компонента отсутствует. При этом строение газонасыщенных грунтов может изменяться при подготовке и в ходе проведения испытаний, что практически невозможно контролировать при стандартных испытаниях грунтов на сдвиг. В результате этого реальное поведение газонасыщенных грунтов под действием сдвиговых нагрузок может существенно отличаться от теоретических положений, разработанных для сплошных тел.

Можно утверждать, что современные общепринятые методики определения прочности газонасыщенных дисперсных грунтов не дают полную достоверную ее характеристику. Это создает предпосылки для разработки специальной методики испытаний таких грунтов, которая позволяла бы контролировать и количественно учитывать характер их строения для объективной оценки их прочностных свойств. Для решения такой задачи авторами был применен метод газонасыщения грунтов путем их смешивания с газонасы-



Рис. 2. Влияние газа на сопротивление сдвигу грунтов. Анализ проведен по материалам исследований дисперсных грунтов [17, 19, 21, 25, 28, 35].

шенными цеолитами с контролируемыми параметрами. Результаты экспериментального определения влияния количественного содержания газов в грунтах на их прочность представлены в данной работе.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве объекта исследования были использованы образцы грунтов, отобранных в районе развития субаквального оползня Красноярский на оз. Байкал (рис. 3). Характерная особенность этого оползня – его приуроченность к скоплению придонных газовых гидратов у подножия склона. Согласно сформулированным гипотезам образования оползня Красноярский [3], ключевым фактором, контролирующим положение тела оползня на склоне авандельты р. Селенга, является аномальная (повышенная относительно фоновых значений) газонасыщенность придонных отложений.

Субаквальный оползень был обнаружен в ходе интерпретации результатов съемки, выполненной в 2009 г. многолучевым эхолотом. Оползень расположен в нижней части склона авандельты р. Селенга на расстоянии около 16 км от береговой линии. У подножия оползня располагается сип “Красный Яр”¹, для которого характерно проявление скоплений приповерхностных газовых гидратов [8].

¹ Сип – место высачивания газа из донных осадков.

Образцы представляют собой набор кернов, отобранных в различных частях дна в районе развития субаквального оползня Красноярский:

- TTR-BL17-261G – участок дна, наиболее удаленный от оползня и сипа “Красный Яр”;
- TTR-BL19-441G – тело оползня;
- TTR-BL19-442G – не нарушенная оползанием часть склона, расположенная выше сипа “Красный Яр”, вблизи оползня;
- TTR-BL19-443G – область развития сипа “Красный Яр”.

Отложения схожи по минеральному составу, что подтверждено данными рентген-дифракционного анализа. Свойства образцов представлены в табл. 1.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Изучение субаквальных склонов, затронутых современными процессами оползания или рассматриваемых как потенциально оползневые, в связи с тектонической активностью региона или активностью процессов флюидоразгрузки, а также повышенной газонасыщенностью осадков, производится, как правило, методами геофизической съемки (сейсмоакустическое профилирование). В настоящей работе рассматривается влияние газовой компоненты на механические свойства грунтов, слагающих склон акватории оз. Байкал, по результатам лабораторных исследований.

Идея использования цеолитов подчерпнута из работы S.J. Wheeler [34]. Предложенный им метод был модифицирован в связи с задачей определе-

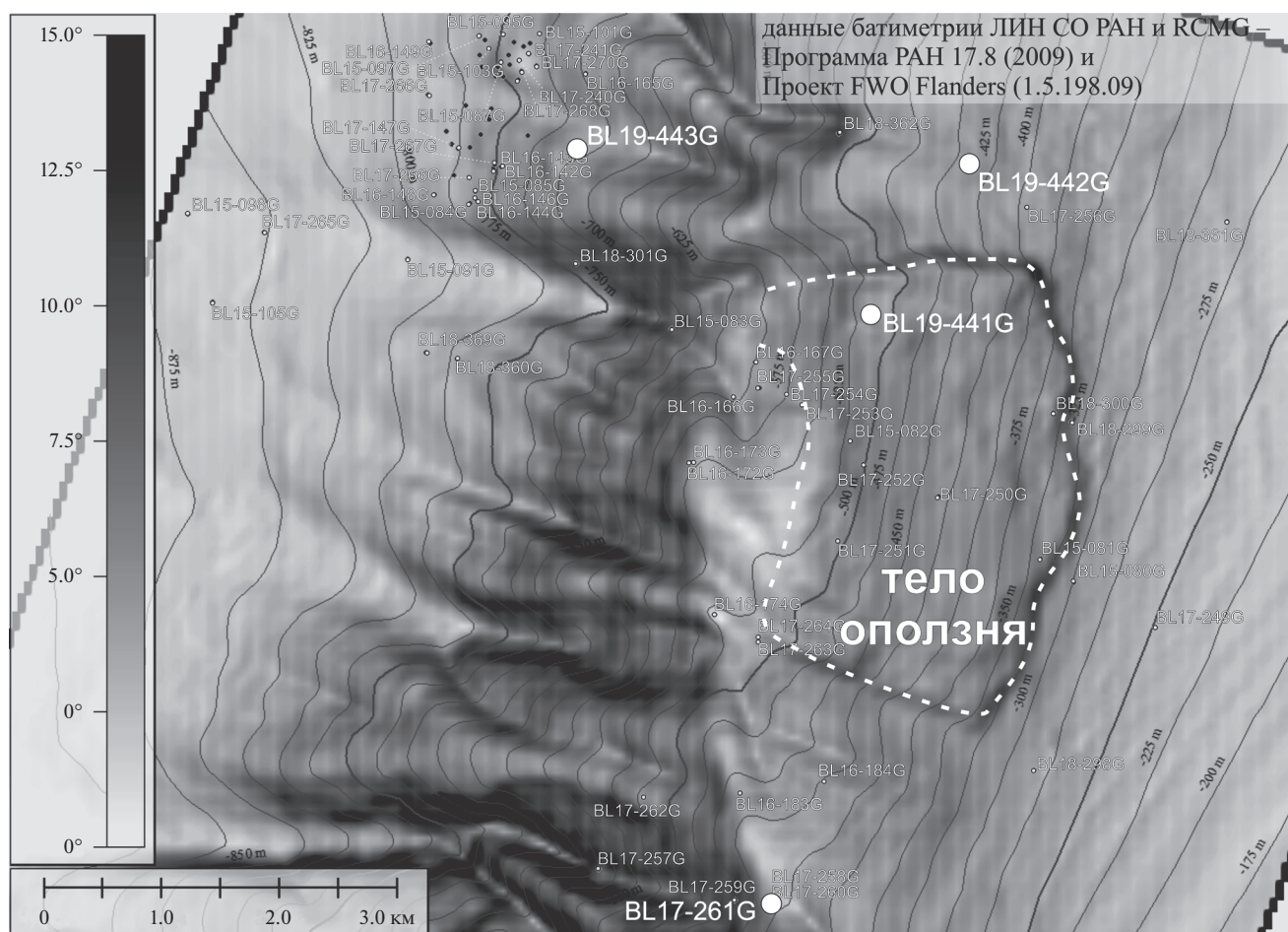


Рис. 3. Батиметрическая схема района развития оползня Красноярский.

ния прочностных характеристик для образцов грунтов, отобранных на полигоне исследований, с сохранением их влажности.

Цеолиты – это химически инертные соединения (природные и искусственные), которые обладают по структуре химической связи родством к полярным молекулам, таким как вода. Цеолиты – большая группа близких по составу и свойствам минералов, водные алюмосиликаты кальция и натрия из подкласса каркасных силикатов, со стеклянным или перламутровым блеском, известные своей способностью отдавать и вновь поглощать воду в зависимости от температуры и влажности. Другое важное свойство цеолитов – способность к ионному обмену – избирательно выделять и вновь впитывать различные вещества, а также обменивать катионы.

Для имитации газонасыщения образцов грунта в цеолит вводится атмосферный воздух (O_2 , CO_2 , N_2 и т.д.), который замещается молекулами воды, когда насыщенный газами цеолит смешивается с влажным грунтом. Выбор марки искусственного цеолита типа 5A, имеющий формулу $Ca_{4.5}Na_3(AlO_2)_{12}30H_2O$, был сделан путем сравне-

ния диаметра молекулы азота 4 \AA с размером пустот, заключенных в кристаллической решетке цеолита.

Цеолиты измельчаются до муки с размером частиц в 6 мкм. В специальную герметичную колбу с цеолитами закачивается атмосферный воздух под давлением 200 кПа, которое поддерживается в течение получаса. Такая процедура позволяет насытить кристаллическую решетку цеолитов молекулами атмосферного воздуха.

Интенсивность адсорбции элементов, составляющих газовую компоненту, на поверхности минеральных частиц меняется в ряду: $CH_4 > CO_2 > N_2 > O_2 > H_2O$. Поэтому адсорбированные газы по составу отличаются от газов, находящихся в свободном состоянии [2, 6].

Сравнение адсорбции N_2 и CH_4 показывает, что из смеси адсорбируется больше метана из-за более сильных взаимодействий с адсорбентом [5]. Это подтверждается моделированием адсорбции смеси CH_4/N_2 [2], причем с ростом парциального давления азота происходит изменение состава флюидной фазы – азот замещает метан.

Таблица 1. Гранулометрический состав и физические свойства исследуемых грунтов (в естественном залегании)

Показатель		Станция №			
		TTR-BL17-261G	TTR-BL19-441G	TTR-BL19-442G	TTR-BL19-443G
Глубина от дна, см		170–210	350–390	180–220	320–360
Содержание частиц различного размера (в мм), %	1.0–0.5	0.7	–	0.4	0.3
	0.5–0.25	1.9	0.8	2.1	0.7
	0.25–0.1	0.9	0.3	0.7	0.8
	0.1–0.05	5.2	6.2	8.4	8.5
	0.05–0.01	4.8	6.3	8.7	8.6
	0.01–0.005	29.9	19.8	22.4	19.9
	<0.005	6.4	12.4	14.8	13.3
	<0.002	50.2	54.2	42.5	47.9
Влажность образца, %		64.6	67.4	77.2	80.6
Плотность, г/см ³		1.66	1.64	1.53	1.51
Плотность частиц грунта, г/см ³		2.73	2.74	2.72	2.73
Пластичность, %	WL	56.2	52.8	61.3	61.2
	WP	31.4	31.6	34.5	35.2
	I _p	24.8	21.2	26.8	26.0
Показатель текучести, д.е.		1.34	1.69	1.59	1.75

Затем цеолит механически перемешивают с грунтом. Цеолиты, содержащиеся в смеси, принимают молекулы воды, отдавая при этом в окружающее пространство молекулы газа (преимущественно азота). Образец устанавливается в сдвиговый прибор, на него передают нормальное давление. В результате образец уплотняется, его объем уменьшается, а в его структуре формируются пузырьки свободного газа, что продемонстрировано ниже по стереометрическим данным строения образцов грунта.

Техника приготовления модельных образцов с помощью газонасыщенных цеолитов позволяет имитировать процессы образования пузырьков газа, которые происходят в морской среде, например, при которых метан образуется вокруг ядер метаногенерирующих бактерий в водонасыщенном уплотняющемся грунте. В лабораторных испытаниях частицы цеолита образуют в грунте ядра формирования пузырьков газа, что позволяет предполагать формирование аналогичной структуры грунта и в естественных условиях морского дна.

В настоящей работе образцы, исходя из соображений безопасности, насыщались атмосферным воздухом. Для контроля объема (концентрации) газа, который цеолиты “передают” к грунтовой пасте, были проведены измерения на хроматографе. Газ из подготовленных образцов был извлечен, грунт дегазировался согласно стандартной методике Head-space [37].

Для установления зависимости концентрации газа от массы цеолитов было проведено 20 изме-

рений, по 5 для каждого из образцов. С 1000 г грунта было смешано 0, 5, 10, 15 и 20 г газонасыщенных цеолитов, и для каждого образца выполнены дегазация и последующее изучение состава газа на газовом хроматографе.

Газовая хроматография выполнялась на портативном газовом хроматографе “Хроматэк-газ-хром 2000” с двумя детекторами по теплопроводности (детектор с повышенной чувствительностью на углеводородные газы и детектор на неуглеводородные газы). В результате было получено отношение концентраций газов из газовой смеси, а также их отношение к атмосферному воздуху, что и послужило параметром, определяющим влияние цеолитов на газонасыщенность грунта.

Определение прочностных характеристик грунтов проводилось на специально подготовленных модельных образцах. Образцы подготавливались из 4 близких по строению разрезов грунтов, отобранных на разных геоморфологических участках акватории оз. Байкал, в районе развития субаквального оползня Красноярский. Навески грунтов массой 1000 г смешивались с 5, 10, 15 и 20 г газонасыщенных цеолитов соответственно. Из полученных смесей, а также из исходных грунтов, в которые цеолиты не добавлялись, изготавливались модельные образцы. Испытания на одноплоскостной срез проводились в недренированных условиях с измерением порового давления, что позволяет определить сцепление (C) и угол внутреннего трения (φ) грунтов в эффективных напряжениях. Испытания прово-

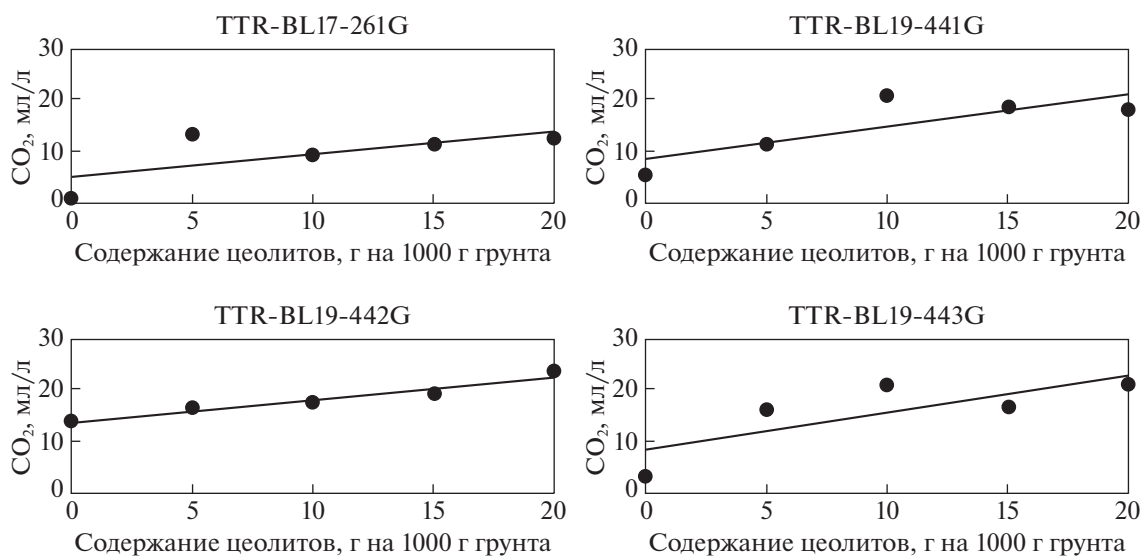


Рис. 4. Изменение концентрации углекислого газа в модельных образцах грунта в зависимости от массы цеолитов.

дились методом одноплоскостного среза, так как именно этот метод позволяет наиболее точно моделировать естественные условия субгоризонтальных нагрузок, приводящих к развитию оползневых процессов.

Для контроля выполнения условия наличия пустот, образованных в ходе дегазации цеолитов, была выполнена съемка 6 образцов на компьютерном томографе SkyScan 1172. Разрешение съемки – 6.5 мкм. Для пробоподготовки грунта к изучению на компьютерном томографе образцы были помещены в пластиковые цилиндры, внутренним диаметром 10 мм.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В результате изучения содержания газа в модельных образцах было установлено, что из атмосферного воздуха цеолиты поглощают молекулы углекислого газа, размер которых составляет 3 Å, также удалось установить линейное увеличение концентрации поглощаемого цеолитами газа по мере увеличения массовой доли цеолитов в смеси с грунтом (рис. 4).

Концентрация свободного газа в образцах, полученная при их взаимодействии с цеолитами, достигает значений 20–30 мл/л, что соответствует фоновым концентрациям газа в осадках изучаемого полигона оз. Байкал [31]. Последующее увеличение массовой доли газонасыщенных цеолитов в образцах позволит увеличить концентрацию газа, но при этом существенно изменит состав модельных образцов, что не может быть сопоставимо с естественными условиями залегания исследуемых грунтов.

Проведенные компьютерно-томографические исследования показывают, что такое изменение

содержания газов в грунтах приводит к существенному изменению их строения. Математический анализ результатов исследований показывает, что повышение концентрации газа в осадочных грунтах оз. Байкал приводит к закономерному увеличению количества пустот размером более 6.5 мкм в их структуре (табл. 2) и изменению параметра сферичности пустот (рис. 5). Исследования были проведены на образцах с ненарушенным (рис. 5б) и нарушенным (рис. 5в) сложением грунта, которые подверглись тому же механическому воздействию, что и образцы, смешанные с цеолитами; на образцах с добавлением цеолитов в количестве 0.5% от массы грунта (рис. 5г), и 2% от массы грунта (рис. 5д).

Параметр сферичности 3-мерного объекта представляет собой отношение площади поверхности сферы (того же объема, что и данный объект) к площади поверхности частицы. Сферичность сферы равна единице по определению, сферичность любой другой формы <1. Использование параметра сферичности позволяет определить приближенность морфологии пустот, образованных вследствие газонасыщения грунтовой пасты цеолитами, к форме сферы, что позволяет сопоставить проводимый эксперимент с моделью образования газовых пузырей в условиях естественного залегания грунтов при повышении их газонасыщенности.

На гистограммах сферичности пустот для каждого из изученных образцов (рис. 6) наглядно прослеживается тенденция к смещению моды к 1, т.е. к распределению показателя, полученному для образца грунта с разрушенными газовыми гидратами, представляющего собой пример образованных в естественных условиях “пузырьковых” пустот.

Таблица 2. Математический анализ строения пустотного пространства в образцах грунтов

Образец	Характеристика	Количество пустот размером > 6.5 мкм, %	Параметр сферичности пустот (преобладающие значения), д.е.
TTR-BL19-441G	Ненарушенный интервал разреза	0.03	0.5
	Механически нарушенный интервал разреза	0.7	0.50–0.53
	Механически нарушенный интервал разреза с добавленными на 1000 г грунта:		
	5 г цеолитов	1.29	0.50–0.55
	10 г цеолитов	1.25	0.50–0.55
	15 г цеолитов	1.13	0.61–0.71
	20 г цеолитов	2.5	0.76–0.82
TTR-BL17-288G	Интервал разреза с включениями газовых гидратов. Станция из области распространения придонных газовых гидратов грязевого вулкана “Большой”, оз. Байкал	9.1	0.84

Результаты проведенных исследований показывают, что увеличение концентрации газа в грунтах при их взаимодействии с газонасыщенными цеолитами вызывает изменение их строения, аналогичное изменениям структуры грунтов в естественных условиях акватории оз. Байкал

при их насыщении газами. Это свидетельствует, что метод смешивания позволяет объективно моделировать процесс газонасыщения грунтов в естественных условиях.

Изменение структуры грунтов при их газонасыщении определяет соответствующее измене-

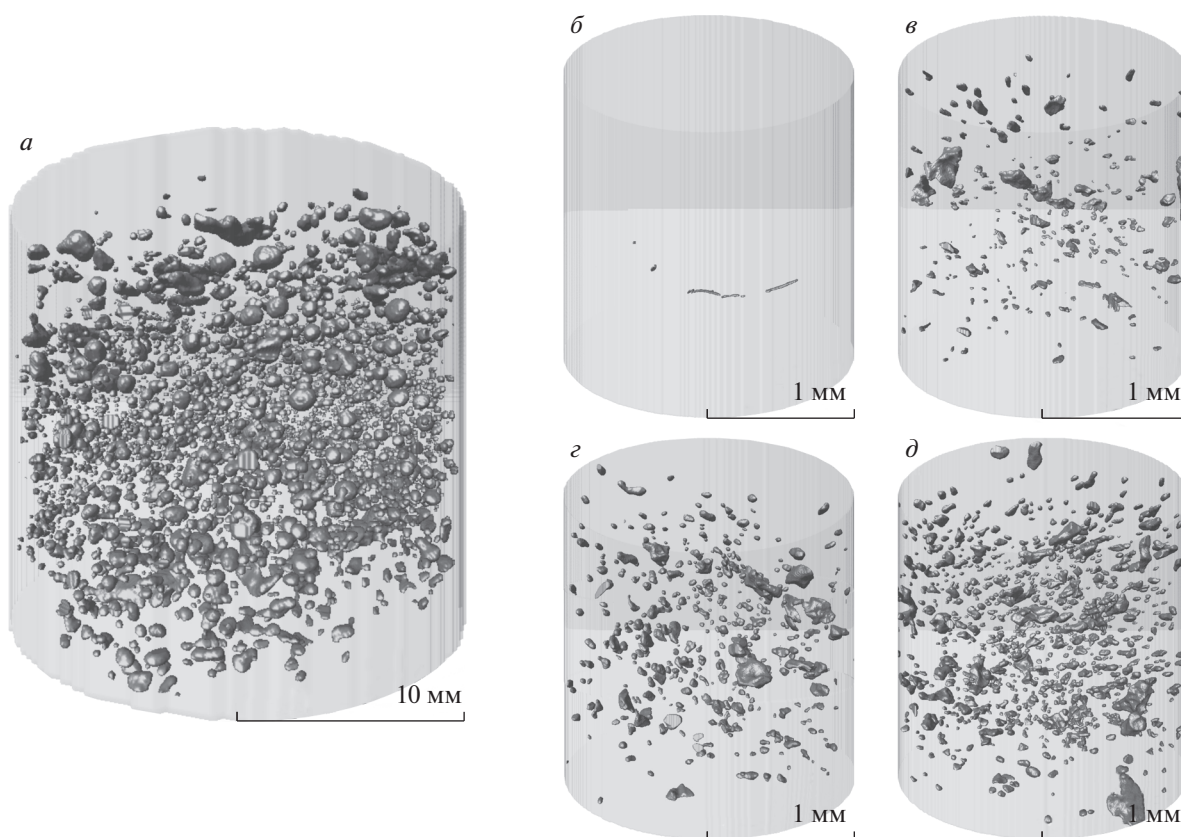


Рис. 5. Трехмерные модели пустот в образцах грунта. *a* – пустоты, образованные в интервале полноразмерного керна грунта за счет быстрой диссоциации газовых гидратов при подъеме керна со дна акватории (станция TTR-BL17-288G экспедиции Class@Baikal); пустоты в пробе грунта: *b* – ненарушенного сложения, *в* – механически нарушенной; механически нарушенной и смешанной с газонасыщенными цеолитами: *г* – 0.5% и *д* – 2% от массы грунта.

Таблица 3. Сцепление (С) и угол внутреннего трения (φ) грунтов, смешанных с газонасыщенными цеолитами

Станция проб-отбора керна	Масса цеолитов на 1000 г грунта, г	Сцепление С, кПа	Угол внутреннего трения φ, град.
TTR-BL19-442G	0	28	7
	5	16	6
	10	13	2
	15	12	4
TTR-BL19-441G	0	34	5
	5	29	4
	10	35	4
	15	26	1
	20	18	1
TTR-BL19-443G	0	21	10
	5	9	7
	10	8	6
	15	7	9
	20	6	7
TTR-BL17-261G	0	19	10
	5	15	8
	10	14	4
	15	12	2
	20	0	1

ние их свойств. Сдвиговые испытания, результаты которых приведены в табл. 3 и показаны на рис. 7, позволили охарактеризовать закономерность этих изменений.

Полученные данные показывают, что изменение строения глинистых грунтов при увеличении количества газов в их составе закономерно приводит к снижению их прочности. Это проявляется в уменьшении как величины сцепления, так и значений угла внутреннего трения. Такие данные повышают достоверность изучения процесса формирования оползней в газонасыщенных глинистых грунтах и должны использоваться при проведении расчетов и моделирования этих процессов.

Достоверность применения описанной методики подготовки образцов и проведения испытаний дополнительно подтверждает анализ морфологии пустот в исследованных грунтах. После проведения сдвиговых испытаний в образцах отмечается наличие визуально различимых пустот, образованных вследствие десорбции газа из цеолитов. Морфология этих пустот позволяет сделать вывод, что газ остается заключенным в них при действии нагрузки на образец; это может слу-

жить моделью среды газ-вода-грунт в естественных условиях залегания грунта.

На рис. 8 изображены внешне отличимые полости в образцах грунтов, испытавших сдвиговые напряжения. Морфология и частота расположения пустот позволяют подтвердить их образование в ходе десорбции газа из цеолитов и насыщение газом пустотного пространства образца. Подобные текстуры наблюдались в работе [33].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренный метод искусственного газонасыщения грунтов показал свою работоспособность на примере изучения донных отложений оз. Байкал. С его помощью было подтверждено высказанное на основе литературных данных предположение о влиянии повышенного содержания свободного газа в грунте на его прочностные свойства (сцепление и угол внутреннего трения). Сопоставление количества газа в образцах (на основании данных газовой хроматографии) с закономерностью изменения их прочностных свойств позволило установить обратную зависимость между концентрацией свободного “пузырькового” газа в придонных отложениях акватории оз. Байкал и их прочностными характеристиками и структурой пустотного пространства. Изменение прочности грунтов при их газонасыщении проявляется как в изменении сцепления, так и в изменении величины угла внутреннего трения. Это свидетельствует о том, что определение параметров сопротивления недренированному сдвигу для газонасыщенных грунтов не позволяет дать достоверную характеристику их прочностных свойств. Для оценки зависимости прочности грунтов от содержания в них газовой компоненты испытания должны проводиться по схеме одноплоскостного среза.

Установленные закономерности позволяют обосновать дополнительные аргументы для объяснения причин формирования субаквальных гравитационных процессов, а также прогнозировать возможность формирования таких процессов. Такие аргументы могут быть получены из анализа данных по содержанию газа в грунтах *in situ* (геохимическая съемка), анализа геофизических данных (аномалии в сейсмоакустической записи, связанные с наличием скоплений газа в грунтах и каналами фильтрации газа в грунтах) и количественно оценены при помощи описанного в работе метода газонасыщения грунтов смешиванием с цеолитами. Первые два метода определяют возможность локализации воздействия газа на устойчивость грунтов, третий — оценить концентрацию газа в грунте, при которой устойчивость отложений достигает предельных значений.

Проведенные исследования позволяют заключить, что предложенный метод искусственного газонасыщения исследуемых образцов может ис-

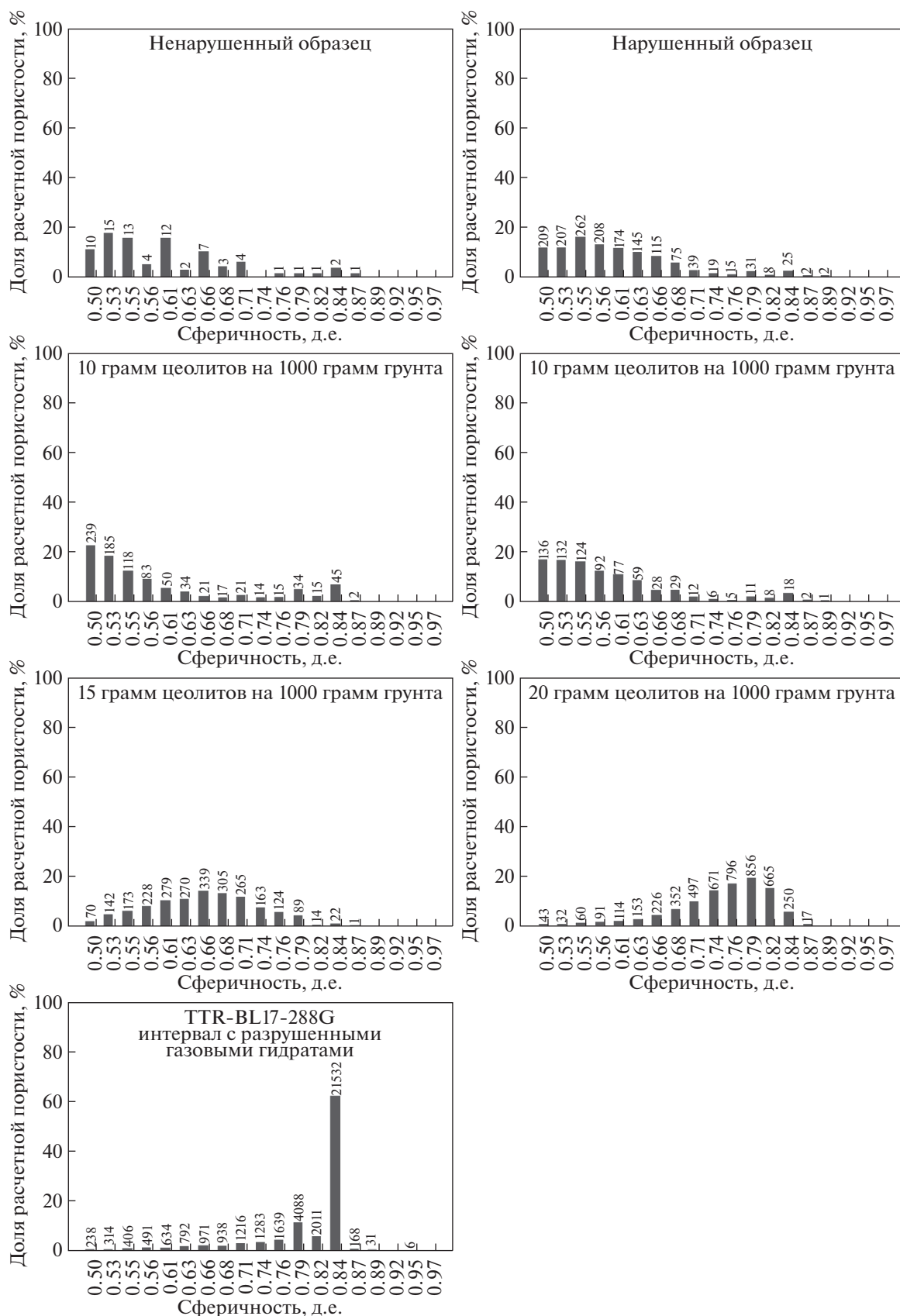


Рис. 6. Гистограммы распределения сферичности пустот в образцах. Значения над столбцами указывают на количество пустот.

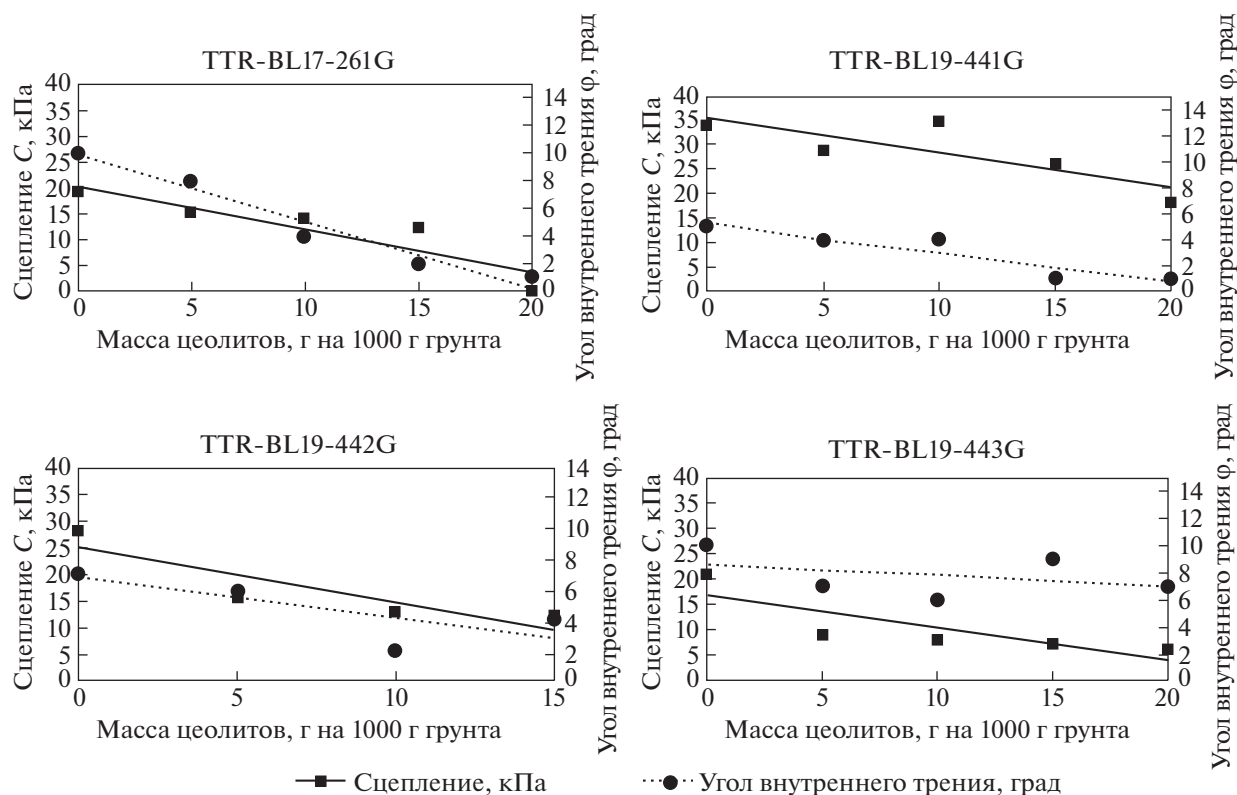


Рис. 7. Зависимость прочности грунтов от содержания газонасыщенных цеолитов.

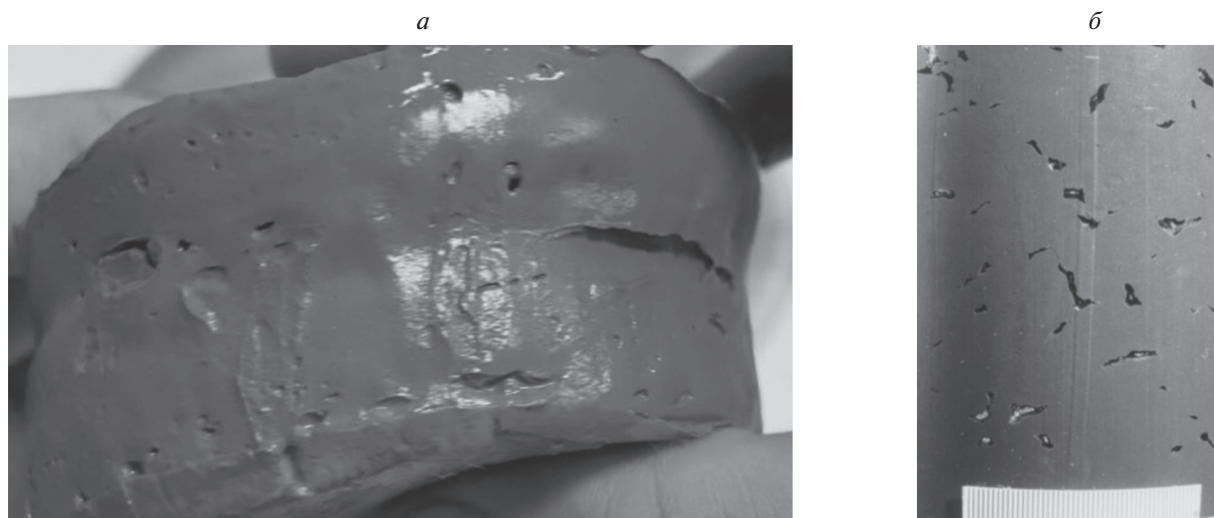


Рис. 8. Пустоты, сформировавшиеся в образце после испытания на одноплоскостной срез (а), и фотография газонасыщенных грунтов (б) по [27].

пользоваться при инженерно-геологических изысканиях на шельфе, в частности для моделирования воздействия областей развития фокусированной флюидоразгрузки в придонной толще дисперсных отложений.

Авторы выражают благодарность коллективу проекта Class@Baikal, работающему под эгидой

Плавучего Университета в рамках международной программы TTR Floating University, сотрудникам лаборатории изучения состава и свойств грунтов ИГЭ РАН им. Е.М. Сергеева, идейному вдохновителю Ахманову Григорию Георгиевичу и организатору экспедиционных работ на оз. Байкал Олегу Михайловичу Хлыстову.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Большаков А.М., Егоров А.В.* Об использовании методики фазово-равновесной дегазации при газометрических исследованиях // *Океанология*. 1987. Т. 27. № 5. С. 861–862.
2. *Ванин А.А., Рул К., Пиотровская Е.М., Бродская Е.Н.* Адсорбция метана, азота и их смесей в порах слоистого углеродного адсорбента по данным компьютерного моделирования // *Журнал физической химии*. 2006. Т. 80. № 8. С. 1465–1472.
3. *Кудачев А.А.* Опыт исследований субаквального Красноярского оползня (оз. Байкал) // Матер. 5-й конференции “День науки 2020”. М.: “КДУ”, “Добросвет”, 2020. № 5. С. 58–61. <https://doi.org/10.31453/kdu.ru.91304.0105>
4. *Рокос С.И.* Газонасыщенные отложения верхней части разреза Баренцево-Карского шельфа: дис. ... канд. географ. наук. Мурманск: Мурман. мор. биол. институт КНЦ РАН, 2009. 89 с. <http://www.dslib.net/oceanologia/gazonasywennye-otlozhenija-verhnej-chasti-razreza-barencevo-karskogo-shelfa.html>
5. *Сизова А.А.* Компьютерное моделирование адсорбции и диффузии флюидов в углеродных и силикатных пористых материалах: дис.канд. хим. наук. С.-Петербург. гос. ун-т, 2015. 174 с. https://disser.spbu.ru/disser2/disser/diss_sizova_a_a.pdf
6. *Трофимов В.Т., Вознесенский Е.А., Королев В.А., Голодковская Г.А. и др.* Грунтоведение / Под ред. В.Т. Трофимова. М.: Изд-во МГУ, 2005. 1024 с.
7. *Ульянова М.О.* Углеродородные газы в поверхностных донных осадках Юго-Восточной части Балтийского моря: дис. ... канд. геогр. наук. Калининград: БФУ имени И. Канта, 2014. <http://www.dslib.net/oceanologia/uglevodorodnye-gazy-v-poverhnostnyh-donnyh-osadkah-jugo-vo-stochnoj-chasti.html>
8. *Хабуев А.В., Ченский Д.А., Соловьева М.А., Белюсов О.В. и др.* Оценка ресурсов газовых гидратов геофизическими методами в зоне подводной разгрузки газа на сипе “Красный Яр” озера Байкал // *Науки о Земле и недропользование*. 2016. № 1 (54). С. 67–74.
9. *Anderson A.L., Hampton L.D.* Acoustics of gas-bearing sediments I. Background // *J. of the Acoustical Society of America*. 1980. V. 67. № 6. С. 1865–1889.
10. *Claypool G.E., Kaplan I.R.* The origin and distribution of methane in marine sediments // *Natural gases in marine sediments*. Springer, Boston, MA, 1974. С. 99–139.
11. *Emmel R., Bjorøy M., Grass G.* Geochemical exploration on the Norwegian continental shelf by analysis of shallow cores // *Petroleum geochemistry in exploration of the Norwegian Shelf*. Springer, Dordrecht, 1985. P. 239–246.
12. *Esrig M.I., Kirby R.C.* Implications of gas content for predicting the stability of submarine slopes // *Marine Georesources & Geotechnology*. 1977. V. 2. № 1–4. P. 81–100.
13. *Faber E., Stahl W.* Analytic procedure and results of an isotope geochemical surface survey in an area of the British North Sea // *Geological Society, London, Special Publications*. 1983. V. 12. № 1. P. 51–63.
14. *Gevirtz J.L., Carey B.D., Blanco S.R.* Surface geochemical exploration in the North Sea // *Geological Society, London, Special Publications*. 1983. V. 12. № 1. P. 35–50.
15. *Grozic J., Robertson P., Morgenstern N.* The behaviour of loose gassy sand // *J. Can. Geotech.* 1999. V. 36. № 3. P. 482–492.
16. *Grozic J.L., Nadim F., Kvalstad T.J.* On the undrained shear strength of gassy clays // *Comp. Geotech.* 2005. V. 32. Is. 7. P. 483–490.
17. *Hong Y., Wang L.Z., Yang B.* Undrained shear behaviour of gassy clay with varying initial pore water pressures // *Proc. of China-Europe Conference on Geotechnical Engineering*. Springer, Cham, 2018. P. 524–528.
18. *Jayasinghe A.G.* Triaxial Compression Strength of Methane Hydrate-Bearing Sediments. PhD Thesis. Calgary: University of Calgary. 2013. <https://doi.org/10.11575/PRISM/28526>
19. *Kaminski P., Urlaub M., Grabe J., Berndt C.* Geomechanical behaviour of gassy soils and implications for submarine slope stability: a literature analysis // *Geological Society, London, Special Publications*. 2020. V. 500. № 1. P. 277–288.
20. *Kar S., Phillips R.* Submarine slope failures in gassy soils // *Int. Conf. on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*. American Society of Mechanical Engineers, 2015. Paper No. OMAE2015-41829, V001T10A015.
21. *Nageswaran S.* Effect of gas bubbles on the sea bed behaviour. Thesis (Ph.D.), United Kingdom: University of Oxford. 1983.
22. *Pietruszczak S., Pande G.N.* Constitutive relations for partially saturated soils containing gas inclusions // *Journal of geotechnical engineering*. 1996. V. 122. № 1. P. 50–59.
23. *Pietruszczak S., Pande G.N., Oulapour M.* A hypothesis for mitigation of risk of liquefaction // *Geotechnique*. 2003. V. 53. № 9. P. 833–838.
24. *Sassen R., Sweet S.T., Milkov A.V., DeFreitas D.A. et al.* Geology and geochemistry of gas hydrates, central Gulf of Mexico continental slope // *Geo-Marine Letters*. 1994. № 14. P. 110–119. <https://doi.org/10.1007/BF01203722>
25. *Sills G.C., Wheeler S.J., Thomas S.D., Gardner T.N.* Behaviour of offshore soils containing gas bubbles // *Geotechnique*. 1991. V. 41. № 2. P. 227–241.
26. *Sills G.C., Wheeler S.J.* The significance of gas for offshore operations // *In: Continental Shelf Research*. 1992. V. 12. № 10. P. 1239–1250.
27. *Sills G.C., Gonzalez R.* Consolidation of naturally gassy soft soil // *Geotechnique*. 2001. V. 51. № 7. P. 629–639.
28. *Sultan N., De Gennaro V., Puech A.* Mechanical behaviour of gas-charged marine plastic sediments // *Géotechnique*. 2012. V. 62. № 9. P. 751–766.
29. *Sweeney R.E.* Petroleum-related hydrocarbon seep age in a Recent North Sea sediment // *Chemical Geology*. 1988. V. 71. № 1–3. P. 53–64.
30. *Thomas S.D.* A finite element model for the analysis of wave induced stresses, displacements and pore pressures in an unsaturated seabed I: theory // *Computers and Geotechnics*. 1989. V. 8. № 1. P. 1–38.
31. *Vidishcheva O.N. et al.* Hydrocarbon Gas Seepage along the Gydratny Fault (Lake Baikal) // *Moscow University Geology Bulletin*. 2021. V. 76. № 4. P. 353–365.
32. *Wang Y., Kong L., Wang M.* Liquefaction response of loose gassy marine sand sediments under cyclic loading // *Bul. Eng. Geol. Env.* 2018. V. 77.3. P. 963–976.

33. Wei J., Wu T., Liang J., Li W. et al. Physical properties of gas hydrate-bearing pressure core sediments in the South China Sea // *Geofluids*. 2021. V. 2021. P. 6636125.
34. Wheeler S.J. The stress-strain behaviour of soils containing gas bubbles. A thesis for the degree of Doctor of Philosophy. Hilary, 1986. 275 p.
35. Wheeler S.J. The undrained shear strength of soils containing large gas bubbles // *Geotechnique*. 1988. V. 38. № 3. P. 399–413.
36. Wheeler S.J. A conceptual model for soils containing large gas bubbles // *Geotechnique*. 1988. V. 38. № 3. C. 389–397.
37. Whelan T., Coleman J.M., Roberts H.H., Suhayda J.N. The occurrence of methane in recent deltaic sediments and its effect on soil stability // *Bul. Eng. Geol. Env.* 1976. V. 13. № 1. P. 55–64.
38. Wu N., Zhang H., Yang S. et al. Gas Hydrate System of Shenhu Area, Northern South China Sea: Geochemical Results // *J. of Geological Research*. 2011. V. 2011.
39. Zander T. et al. Potential impacts of gas hydrate exploitation on slope stability in the Danube deep-sea fan, Black Sea // *Marine and Petroleum Geology*. 2018. V. 92. P. 1056–1068.
40. Zhang M., Niu M., Shen S., Dai S., Xu Y. Review of natural gas hydrate dissociation effects on seabed stability // *Natural Hazards*. 2021. V. 107. № 2. P. 1035–1045.

EVALUATION OF THE EFFECT OF PORE WATER SATURATION WITH GAS ON PHYSICAL PROPERTIES OF FINE COHERENT (CLAY) SOILS BY MIXING WITH ZEOLITES

A. A. Kudaev^{a,#}, F. S. Karpenko^{b,##}, D. V. Korost^{a,###}, O. N. Vidishcheva^{a,####}, and M. M. Kuchukov^{b,#####}

^a *Geological Faculty, Lomonosov Moscow State University, Leninskiye Gory, 1, Moscow, 119234 Russia*

^b *Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences, Ulanskii per., 13, str. 2, Moscow, 101000 Russia*

[#] *E-mail: a.a.kudaev@gmail.com*

^{##} *E-mail: kafs08@bk.ru*

^{###} *E-mail: dkorost@mail.ru*

^{####} *E-mail: vid6877@yandex.ru*

^{#####} *E-mail: kuchukov.m@gubkin.ru*

The method of preparing artificial samples (paste) of fine clay with a given gas saturation is described. The method consists in mixing zeolites presaturated with gas with bottom sediments. A pattern of changes in physical and mechanical properties due to varying water saturation, density and gas saturation was established for the samples. The proposed method allows modeling changes in the physical and mechanical properties of dispersed bottom sediments depending on the amount of gas, which is applicable for *in situ* conditions of bottom sediments, and changes in gas concentrations associated with both zones of focused discharge and the transformation of organic matter in bottom sediments. Modeling the soil saturation with gas on the slope, along which the subaqueous landslide developed, made it possible to estimate the contribution of gas component to the change in the strength characteristics of soils. The described method can be used in geological exploration for hydrocarbons in shelf conditions, as well as in engineering and geological surveys to assess the bearing capacity of soils when the gas saturation of bottom sediments changes.

Keywords: *gas-saturated soils, bottom sediments, zeolites, gas saturation modeling, slope stability, subaqueous landslides, CT-scan*

REFERENCES

1. Bol'shakov, A.M., Egorov, A.V. *Ob ispol'zovanii metodi-ki fazovo-ravnovesnoi degazatsii pri gazometricheskikh issledovaniyakh* [The use of phase-equilibrium degassing method in gasometric studies]. *Okeanologiya*, 1987, vol. 27, no. 5, pp. 861–862. (in Russian)
2. Vanin, A.A., Rul, K., Piotrovskaya, E.M., Brodskaya, E.N. *Adsorbtsiya metana, azota i ikh smesei v porakh sloistogo uglerodnogo adsorbenta po dannym komp'yuternogo modelirovaniya* [Adsorption of methane, nitrogen and their mixtures in pores of lamellar carbon adsorbent by the computer modeling data]. *Zhurnal fizicheskoi khimii*, 2006, vol. 80, no. 8, pp. 1465–1472. (in Russian)
3. Kudaev, A.A. *Opyt issledovaniy subakval'nogo Krasnoyarskogo opolznya (oz. Baikal)* [Experience of studying the Krasnoyarsk subaqueous landslide (Lake Baikal)]. *Materialy 5-i konferentsii "Den' nauki 2020"* [Proc. the 5th Science Day 2020 Conference]. Moscow, KDU, Dobrovosvet Publ., 2020, no. 5, pp. 58–61. (in Russian)
4. Rokos, S.I. *Gazonasyschennye otlozheniya verkhnei chasti razreza Barentsevo-Karskogo shel' fa.* [Gas-saturated deposits of the upper part of the section of the Barents-Kara shelf]. Cand. Sci. (Geogr.) Diss. Murmansk, Murmansk Marine Biological Institute, Kola Science Center RAS, 2009, 89 p. (in Russian)
5. Sizova, A.A. *Komp'yuternoe modelirovanie adsorbtsii i diffuzii flyuidov v uglerodnykh i silikatnykh poristykh materialakh* [Computer simulation of adsorption and diffusion of fluids in carbon and silicate porous materials]. Cand. Sci. (Chem.) Diss., St. Petersburg, St. Petersburg State University, 2015, 174 p. (in Russian)
6. Trofimov, V.T. Voznesenskii, E.A., Korolev, V.A., Golodkovskaya, G.A., et al. *Gruntovedenie* [Soil and rock engineering]. Moscow, MGU Publ., 2005, 1024 p. (in Russian)

7. Ul'yanova, M.O. Uglevodorodnye gazy v poverkhnostnykh donnykh osadkakh Yugo-Vostochnoi chasti Baltiskogo morya [Hydrocarbon gases in surface bottom sediments in the southeastern part of the Baltic Sea]. Cand. Sci. (Geogr.) Diss., Kaliningrad, Kant Baltic Federal University, 2014. (in Russian)
8. Khabuev, A.V., Chenskii, D.A., Solov'eva, M.A., Belousov, O.V. et al. *Otsenka resursov gazovykh gidratov geofizicheskimi metodami v zone podvodnoi razgruzki gaza na sipe "Krasnyi Yar" ozera Baikal* [Estimation of gas hydrate resources in the underwater gas discharge zone on the Krasny Yar seep of Lake Baikal by geophysical methods]. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie*, 2016, vol. 54, no. 1, pp. 67–74. (in Russian)
9. Anderson, A.L., Hampton, L.D. Acoustics of gas-bearing sediments. I. Background. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1980, vol. 67, no. 6, pp. 1865–1889.
10. Claypool, G.E., Kaplan, I.R. The origin and distribution of methane in marine sediments. In: *Natural gases in marine sediments*. Springer, Boston, MA, 1974, pp. 99–139.
11. Emmel, R.H., Bjarøy, M., van Grass, G. Geochemical exploration on the Norwegian continental shelf by analysis of shallow cores. In: *Petroleum geochemistry in exploration of the Norwegian Shelf*. Springer, Dordrecht, 1985, pp. 239–246.
12. Esrig, M.I., Kirby, R.C. Implications of gas content for predicting the stability of submarine slopes. *Marine georesources & geotechnology*, 1977, vol. 2, no. 1–4, pp. 81–100.
13. Faber, E., Stahl, W. Analytic procedure and results of an isotope geochemical surface survey in an area of the British North Sea. London, Geological Society, Special Publications, 1983, vol. 12, no. 1, pp. 51–63.
14. Gevirtz, J.L., Carey, B.D., Blanco, S.R. Surface geochemical exploration in the North Sea. London, Geological Society, Special Publications, 1983, vol. 12, no. 1, pp. 35–50.
15. Grozic, J., Robertson, P., Morgenstern, N., The behaviour of loose gassy sand. *Can. Geotech. J.*, 1999, vol. 36, no. 3, pp. 482–492.
16. Grozic, J.L., Nadim, F., Kvalstad, T.J. On the undrained shear strength of gassy clays. *Comp. Geotech.*, 2005, vol. 32, no. 7, pp. 483–490.
17. Hong, Y., Wang, L.Z., Yang, B. Undrained shear behaviour of gassy clay with varying initial pore water pressures. Proc. of China-Europe Conference on Geotechnical Engineering. Springer, Cham, 2018, pp. 524–528.
18. Jayasinghe, A.G. Triaxial compression strength of methane hydrate-bearing sediments. PhD Thesis. Calgary, University of Calgary, 2013. <https://doi.org/10.11575/PRISM/28526>
19. Kaminski, P., Urlaub, M., Grabe, J., Berndt, C. Geomechanical behaviour of gassy soils and implications for submarine slope stability: a literature analysis. Geological Society, London, Special Publications, 2020, vol. 500, no. 1, pp. 277–288.
20. Kar, S., Phillips, R. Submarine slope failures in gassy soils. Int. Conf. on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. American Society of Mechanical Engineers, 2015, paper no. 56475, V001T10A015.
21. Nageswaran, S. Effect of gas bubbles on the sea bed behaviour. Thesis (Ph.D.), United Kingdom: University of Oxford. 1983.
22. Pietruszczak, S., Pande, G.N. Constitutive relations for partially saturated soils containing gas inclusions. *Journal of geotechnical engineering*, 1996, vol. 122, no. 1, pp. 50–59.
23. Pietruszczak, S., Pande, G.N., Oulapour, M. A hypothesis for mitigation of risk of liquefaction. *Geotechnique*, 2003, vol. 53, no. 9, pp. 833–838.
24. Sassen, R., Sweet, S.T., Milkov, A.V., DeFreitas, D.A., Salata, G.G., McDade, E.C. Geology and geochemistry of gas hydrates, central Gulf of Mexico continental slope. *Geo-Marine Letters*, 1994, no. 14, pp. 110–119. <https://doi.org/10.1007/BF01203722>
25. Sills, G.C., Wheeler, S.J., Thomas, S.D., Gardner, T.N. Behaviour of offshore soils containing gas bubbles. *Geotechnique*, 1991, vol. 41, no. 2, pp. 227–241.
26. Sills, G.C., Wheeler, S.J. The significance of gas for offshore operations. *Continental Shelf Research*, 1992, vol. 12, no. 10, pp. 1239–1250.
27. Sills, G.C., Gonzalez, R. Consolidation of naturally gassy soft soil. *Géotechnique*, 2001, vol. 51, no. 7, pp. 629–639.
28. Sultan, N., De Gennaro, V., Puech, A. Mechanical behaviour of gas-charged marine plastic sediments. *Géotechnique*, 2012, vol. 62, no. 9, pp. 751–766.
29. Sweeney, R.E. Petroleum-related hydrocarbon seep age in a Recent North Sea sediment. *Chemical Geology*, 1988, vol. 71, no. 1–3, pp. 53–64.
30. Thomas, S.D. A finite element model for the analysis of wave induced stresses, displacements and pore pressures in an unsaturated seabed I: theory. *Computers and Geotechnics*, 1989, vol. 8, no. 1, pp. 1–38.
31. Vidishcheva, O.N., et al. Hydrocarbon gas seepage along the Gydratny Fault (Lake Baikal). *Moscow University Geology Bulletin*, 2021, vol. 76, no. 4, pp. 353–365.
32. Wang, Y., Kong, L., Wang, M. Liquefaction response of loose gassy marine sand sediments under cyclic loading. *Bul. Eng. Geol. Env.*, 2018, vol. 77, no. 3, pp. 963–976.
33. Wei, J. Wu, T., Feng, X. et al. Physical properties of gas hydrate-bearing pressure core sediments in the South China Sea. *Geofluids*, 2021, vol. 2021, paper no. 6636125.
34. Wheeler, S.J. The stress-strain behaviour of soils containing gas bubbles. PhD Thesis, Hilary, 1986, 275 p.
35. Wheeler, S.J. The undrained shear strength of soils containing large gas bubbles. *Géotechnique*, 1988, vol. 38, no. 3, pp. 399–413.
36. Wheeler, S.J. A conceptual model for soils containing large gas bubbles. *Géotechnique*, 1988, vol. 38, no. 3, pp. 389–397.
37. Whelan, T., Coleman, J.M., Roberts, H.H., Suhayda, J.N. The occurrence of methane in recent deltaic sediments and its effect on soil stability. *Bul. Eng. Geol. Env.*, 1976, vol. 13, no. 1, pp. 55–64.
38. Wu, N. et al. Gas hydrate system of Shenhu Area, Northern South China Sea: geochemical results. *Journal of Geological Research*, 2011, vol. 2011.
39. Zander, T., et al. Potential impacts of gas hydrate exploitation on slope stability in the Danube deep-sea fan, Black Sea. *Marine and Petroleum Geology*, 2018, vol. 92, pp. 1056–1068.
40. Zhang, M. et al. Review of natural gas hydrate dissociation effects on seabed stability. *Natural Hazards*, 2021, vol. 107, no. 2, pp. 1035–1045.

УДК 551.3;624.13

ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТОВ УСТОЙЧИВОСТИ СКЛОНА ПРИ ОБРАЗОВАНИИ НОВОГО ОПОЛЗНЕВОГО БЛОКА

© 2022 г. Г. П. Постоев^{1,*}, А. И. Казеев¹, М. М. Кучуков¹¹ Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН (ИГЭ РАН),
Уланский пер., 13, стр. 2, Москва, 101000 Россия

*E-mail: opolzen@geoenv.ru

Поступила в редакцию 28.06.2022 г.

После доработки 23.07.2022 г.

Принята к публикации 27.07.2022 г.

При подготовке в коренном массиве нового оползневого блока возникают диссипативные геологические структуры (ДГС) в соответствии с физико-геологическими закономерностями функционирования геологической среды на участке развития оползневого очага. Отделение блока происходит как отторжение ДГС по ее границе (оболочке) с разрывом структурных связей в грунтах и последующим вращательным смещением ДГС-блока (в пределах оболочки) по образовавшейся поверхности скольжения как оползневого массива. Выполнен анализ сопоставительных расчетов оценки состояния массива при подготовке блока как ДГС и по существующим методам расчета устойчивости (в частности, в программе Geostab). Учет механизма и закономерностей подготовки ДГС-блока при оценке состояния массива позволяет повысить точность и достоверность расчетных процедур.

Ключевые слова: диссипативные геологические структуры, напряженно-деформированного состояния, закономерности, критерии, предельное состояние, расчеты, схемы ДГС и сдвига

DOI: 10.31857/S0869780922050071

Образование и смещение нового блока на оползневом участке вызывают разрушительные деформации склона. Размеры блока по фронту могут составлять десятки и сотни метров. Известно, что оползневой участок (очаг) в связи с развитием деформаций осуществляет внешнее воздействие на коренной массив, примыкающий к нему в верхней части склона, вызывая образование в нем диссипативных геологических структур (ДГС) [3, 6]. При этом коренным образом изменяется напряженно-деформированное состояние (НДС) в массиве. Существующие расчетные технологии не учитывают изменения НДС оползнеопасных массивов при подготовке нового оползневого блока, что может отражаться на точности и достоверности прогнозных расчетов и надежности защитных мероприятий.

В статье рассматриваются основные закономерности образования оползневого блока (подготовленной ДГС) и его отделение от коренного массива, учет которых в расчетных процедурах позволит повысить эффективность работ по контролю и предупреждению разрушительных оползневых деформаций.

ИСХОДНОЕ НДС ОПОЛЗНЕОПАСНОГО КОРЕННОГО МАССИВА И ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПОДГОТОВКИ ДГС-БЛОКА

Рассматривается участок с развитием блокового оползня типа сжатия-выдавливания. Оценивается возможность образования нового оползневого блока в коренном массиве надоползневого уступа. В исходном состоянии массива (без влияния оползневого очага) напряжения в поле тяготения Земли распределяются по закону Кулона-Мора (как в воздушной и водной средах – по закону Паскаля). В соответствии с работой [6], давление в i -й точке определяется по формуле:

$$p_i = (\gamma Z_i - \sigma_{str,i}) \operatorname{tg}^2 \left(45 - \frac{\varphi_i}{2} \right), \quad (1)$$

где p_i – давление распора в точке массива; γ – среднее значение удельного веса грунтов над i -й точкой; Z_i – глубина от поверхности плато до расположения рассматриваемой точки; $\sigma_{str,i}$ – структурная прочность грунта в i -й точке; φ_i – угол внутреннего трения грунта.

Оползневой очаг оказывает внешнее воздействие (силовое возмущение) на коренной массив, вызывая локальную разгрузку напряжений (снижение вертикального давления) на участке его от-

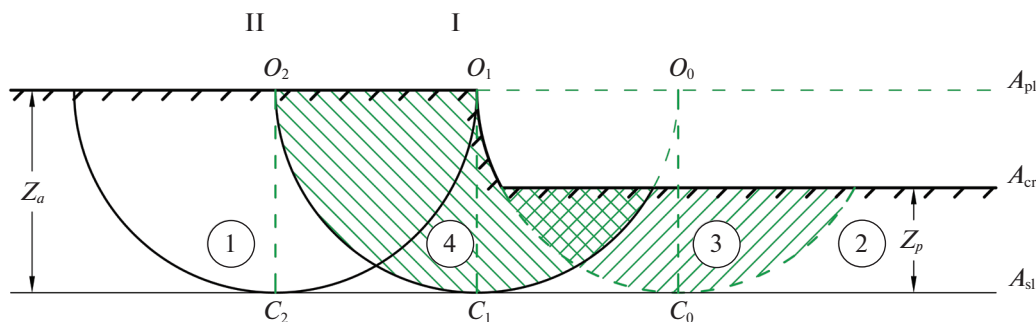


Рис. 1. Схема расположения диссипативных геологических структур по центральному сечению оползневого очага при формировании нового оползневого блока: 1 и 2 – коренной и оползневой массивы соответственно; 3 – смещенный оползневый блок с дневной поверхностью на уровне оползневой террасы в завершении оползневого цикла; 4 – ДГС в коренном массиве; 4 – ДГС (подготавливаемый блок) в предельном состоянии коренного массива надоползневой уступа по контакту с оползневой террасой, ($Z_a - Z_p = H_{cr}$); C_0, C_1, C_2 – точки ДГС на горизонте базиса диссипации; A_{pl}, A_{cr} и A_{sl} – уровни плато, оползневой террасы (на момент завершения оползневого цикла) и основной поверхности скольжения оползневой массы (базиса) соответственно.

коса и формирование ДГС для защиты массива от развития оползневого процесса. При этом поверхность скольжения ранее смещенных блоков (в оползневом очаге) регламентирует расположение нижней границы диссипации (базиса) в коренном массиве. ДГС имеет геометрически правильную границу – поверхность свода над зоной разгрузки напряжений (в сечении – дуга окружности). В данном случае зона разгрузки напряжений находится над базисом, и свод (граничная поверхность ДГС) вогнутой частью направлен вверх. Радиус окружности (основной параметр ДГС) – это глубина от дневной поверхности ДГС (будущего оползневой блока) до базиса Z_a (рис. 1).

К настоящему времени установлено, что образование ДГС в оползнеопасном коренном массиве – это физический процесс защиты исходного состояния геологической среды от проникновения вглубь разрушительных глубоких оползневых деформаций. Получены закономерности преобразования НДС, формирования граничной оболочки и возникновения в ней аномальных напряжений, определяющих локализацию ДГС и ее взаимодействие с оползневой поверхностью [7]. Предельное состояние ДГС устанавливается как результат этого взаимодействия.

Вывод уравнения предельного состояния ДГС

Ранее [4] было получено уравнение предельного состояния коренного массива при образовании нового оползневой блока при условии равенства горизонтальных напряжений распора σ_{3a} и отпора $\sigma_{3p,cr}$, когда высота откоса надоползневой массы и, соответственно, вертикальное давление на грунты на горизонте базиса (в сечении по центральному створу) достигнут критических значений:

$$\gamma Z_a - \sigma_{str,a} = \frac{\pi}{2} \gamma Z_{p,cr}, \quad (2)$$

где $Z_{p,cr}$ – критическая (расчетная) глубина до потенциально деформирующегося горизонта (базиса оползания) в массиве склоновых отложений ($Z_{p,cr} = Z_a - H_{cr}$); $\sigma_{str,a}$ – структурная прочность грунта на уровне базиса Z_a .

Установлено, что при подготовке оползня в исходном коренном массиве возникают ДГС в виде блоков-полуцилиндров (в сечении по створу, проходящему через центр очага – полуокруга). Рассматривается взаимодействие ДГС4 (в коренном массиве – блок с центром O_1) и ДГС3 (в оползневом массиве – блок с центром O_0) в сечении по центральному створу (см. рис. 1).

Определение напряжения в нижней точке ДГС4.

Вертикальное давление грунта на глубине Z_i равно $\sigma_{1i} = \gamma Z_i$. В соответствии с законом Кулона-Мора внутреннее распорное давление на оболочку определяется по (1).

Используя уравнение Лапласа и принимая радиус кривизны ДГС4 (по длине блока) равным бесконечности [4, 5], получаем для точки C_1 (нижней точки в ДГС4, где действует максимальное распорное давление) напряжение в оболочке:

$$\sigma_{C_1} = p_{C_1} \frac{Z_a}{h} = (\gamma Z_a - \sigma_{str,C_1}) \operatorname{tg}^2 \left(45 - \frac{\Phi}{2} \right) \frac{Z_a}{h}, \quad (3)$$

где p_{C_1} и σ_{C_1} – соответственно распорное и круговое напряжения (в вертикальном сечении) в точке C_1 оболочки ДГС4; h – толщина оболочки; σ_{str,C_1} – структурная прочность грунта в точке C_1 .

Определение напряжения в ДГС3 оползневой массы. ДГС3 является частью оползневой массы. В предельном состоянии для ДГС4 дневная поверхность оползневой блока-ДГС3 должна находиться на уровне H_{cr} . Принимается, что вес

грунтовой массы ДГСЗ концентрируется в оболочке структуры, определяя внешнее давление q на структуру и значения главных напряжений, действующих в оболочке. При этом внешнее давление $q = -p$. Для расчета рассматриваем единичное сечение — ДГСЗ в виде сегмента круга радиусом Z_a с горизонтальной хордой на глубине H_{cr} от верха (центра круга). Для i -го горизонта в сегменте ДГСЗ давление грунтовых масс на оболочку определяется выражением:

$$p_i = \gamma(Z_i - H_{cr})\text{tg}^2\left(45 - \frac{\Phi}{2}\right), \quad (4)$$

где Z_i — глубина от поверхности надоползневого уступа до i -го горизонта.

Значение структурной прочности в уравнении отсутствует, так как ДГСЗ смещается как оползневой блок по поверхности скольжения в оболочке. Поскольку внешнее давление от ДГС4 работает на подъем ДГСЗ, то значение давления на оболочку в i -й точке (i -го горизонта) от веса вышележащих грунтовых масс определяется интегрированием в пределах дуги при изменении центрального угла α от 0 до α_i .

$$q_i = \int p_i \alpha_i d\alpha = \int \gamma(Z_i - H_{cr})\text{tg}^2\left(45 - \frac{\Phi}{2}\right) \alpha_i d\alpha, \quad (5)$$

где α_i — центральный угол отклонения от горизонтали до нормали к оболочке в ее i -й точке. Максимальное напряжение в оболочке создается в точке C_0 при $\alpha_C = \pi/2$. Соответственно внешнее давление q_{C_0} на оболочку в точке C_0 составит:

$$q_{C_0} = \gamma \frac{\pi}{2} (Z_a - H_{cr})\text{tg}^2\left(45 - \frac{\Phi}{2}\right). \quad (6)$$

Уравнение Лапласа для ДГСЗ выглядит следующим образом:

$$\frac{\sigma_m}{R} + \frac{\sigma_t}{Z_a} = \frac{q}{h}, \quad (7)$$

здесь R — радиус кривизны оползневого блока ДГСЗ, определяющий локальные границы оползневого очага; σ_m и σ_t — соответственно меридиональное (параллельно бровке склона) и круговое напряжения (в вертикальном сечении) в оболочке ДГС. Но в сечении по центральному створу кривизна блока в меридиональном направлении практически не оказывает влияния на его взаимодействие с коренным массивом, т.е. и здесь можно принять $R = \infty$.

Соответственно получим критическое значение напряжения в оболочке σ_{tC_1} из (6) и (7):

$$\sigma_{tC_0} = Z_a \frac{q_{C_0}}{h} = \frac{Z_a}{h} \gamma \frac{\pi}{2} (Z_a - H_{cr})\text{tg}^2\left(45 - \frac{\Phi_a}{2}\right), \quad (8)$$

где Φ_a — значение угла внутреннего трения грунта Z_a .

Уравнение предельного состояния массива надоползневого уступа определяется по равенству напряжений на горизонте базиса оползня в нижних точках диссипативных структур (C_0 оползневого блока ДГСЗ и C_1 — ДГС4) из выражений (3) и (8):

$$\gamma Z_a - \sigma_{str,C} = \frac{\pi}{2} \gamma (Z_a - H_{cr}). \quad (9)$$

Нижние точки рассмотренных структур находятся на глубине Z_a , и полученное ранее уравнение (2) и новое (9) полностью идентичны.

Закономерности и этапы подготовки отделения ДГС-блока

Расчетная поверхность скольжения — окружность радиусом Z_a . Так как ДГС-блок отделяется и смещается по оболочке, расчет производится по его центральному створу, где формируется предельное состояние всего ДГС-блока. Поверхность скольжения (ПС) — дуга окружности радиусом Z_a . Часть оползневого массива, расположенная ниже по створу за пределами оболочки ДГС-блока, не участвует в оценке состояния ДГС-блока, его отделении и в расчете устойчивости.

Напряжения в оболочке ДГС. В условиях равновесного состояния ДГС при компрессионном сжатии массива в грунтах оболочки возникают напряжения, более чем на два порядка превышающие значения давления в точке. Наибольшие их значения достигаются в грунтах на горизонте базиса. В соответствии с (8) напряжения в оболочке превышают значение давления в точке в $Z_a/h = 1/0.009$ раза. Под действием высоких значений напряжений в узкой зоне оболочки происходят поворот ДГС и скашивание (деформация грунта как при простом сдвиге) грунтов в оболочке (см. ниже).

Появление трещины закола (опущенной трещины растяжения) на поверхности коренного оползнеопасного массива свидетельствует о том, что ДГС-блок приближается к моменту отделения от коренного массива, и является индикатором начала вращения ДГС по оболочке. С перемещением (вращением) ДГС начинается процесс скашивания грунтов в оболочке. При этом **грунты в оболочке сохраняют исходные значения прочности, в том числе на горизонте базиса.** Структурные связи в первоначальном состоянии. НДС в точке C_1 базиса (см. рис. 1) определяется по (9). Поверхность скольжения отсутствует. ДГС-блок является частью коренного массива.

Завершение процесса скашивания грунтов в оболочке ДГС-блока. Грунты в оболочке находятся в узкой напряженной зоне. Толщина оболочки $h = 0.009Z_a$ (т.е. более чем в 100 раз меньше основного параметра Z_a). Критическое значение смещения грунта в оболочке (дуга) составляет:

$$\Delta_{cr} = h = 0.009Z_a. \quad (10)$$

Эти параметры подтверждаются также результатами обобщения наблюдаемых данных оползневых блоковых смещений бортов карьеров и откосов отвалов, полученными А.М. Деминим [1]. При этом в соответствии с механизмом функционирования ДГС, угол поворота ДГС-блока $\alpha_{cr} = 0.00901944$ радиан (или $\alpha_{cr} = 0^\circ(\pi^3)'$ (ноль градусов π^3 минут)). Грунты в оболочке сохраняют исходные значения прочности. В точке C_1 достигается предельное состояние, в том числе по предельным значениям смещения и поворота ДГС-блока. Поверхности скольжения пока нет. ДГС-блок является частью коренного массива. **Состояние устойчивости ДГС-блока – предельное** и по (9), и по критическим значениям Δ_{cr} и α_{cr} . Однако при этом не происходит сразу нарушения устойчивости массива надоползневого уступа. В оболочке ДГС-блока начинается процесс скашивания грунтов с одновременным поворотом ДГС-блока по окружности радиусом Z_a (в сечении по центральному створу).

Отделение ДГС-блока. По достижении условия предельного состояния в соответствии с (9) и критических значений Δ_{cr} и α_{cr} происходит разрыв структурных связей в грунтах оболочки ДГС на горизонте базиса по центральному створу участка подготовки оползневого блока. Одновременно структурные связи разрушаются по всей протяженности оболочки ДГС-блока. Образуется поверхность скольжения (сдвига). Возникший новый блок становится оползневым (в правой части уравнения (9) также возникает множитель $\pi/2$). Создается опасное отношение моментов сдвигающих и удерживающих сил $\gamma Z_a / \gamma(Z_a - H_{cr})$. Расчет устойчивости производится по центральному створу с поверхностью скольжения в виде дуги окружности радиусом Z_a в условиях, когда $c = 0$ и $\sigma_{sr} = 0$, угол φ – как по подготовленной поверхности (повторный сдвиг). При этом возникает неуравновешенный момент, вызывающий резкое смещение тыловой части блока.

Коэффициент запаса K_3 устойчивости склона можно оценивать по степени приближения величины текущего смещения ДГС-блока относительно его предельного значения, в частности используя выражение:

$$K_3 = \Delta_{cr} / \Delta_i. \quad (11)$$

Когда K_3 становится равным единице, возникает ПС с разрывом структурных связей, происходит отделение ДГС-блока, и в соответствии с (9) отношение удерживающих сил в ДГС-блоке на горизонте базиса к сдвигающим силам достигает запредельно низкого значения $\gamma(Z_a - H_{cr}) / \gamma Z_a \approx 0.5$.

Ниже приводятся сопоставительные расчеты состояния коренного массива при образовании

оползневого блока по схемам ДГС и сдвига (Geostab) на примере оползня на участке Хорошево (2007 г.).

ХАРАКТЕРИСТИКА СУЩЕСТВУЮЩИХ РАСЧЕТНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Модели образования блока на основе закона Кулона–Мора в касательных напряжениях

Вследствие возникновения пластических деформаций грунтов и из-за превышения действующими касательными напряжениями сопротивления сдвигу грунтов в точках массива при фактических значениях нормальных напряжений, происходит концентрация смещений в определенных зонах, т.е. формирование наиболее опасной поверхности скольжения. Грунтовый массив представляет собой сложную геологическую среду, к которой идеализированные схемы трудно применимы. Обычно используется схематизация инженерно-геологических условий и расчетных моделей. Чаще всего принимается круглоцилиндрическое очертание поверхности скольжения, особенно для массива однородного сложения. Существует ряд методических рекомендаций по выполнению расчетных процедур для определения коэффициента устойчивости склона (базирующиеся в основном на рассмотрении плоской задачи механики грунтов) путем подбора центра наиболее опасной поверхности скольжения, по которой коэффициент устойчивости имеет минимальное значение. Используются и другие очертания возможной поверхности скольжения: в виде плоских площадкам – методы Г.М. Шахунянца и Р.Р. Чугаева, Маслова-Беррера – метод горизонтальных сил), схемы с предположением утолщенной зоны смещения и деформированием ее в виде выдавливания и др. Однако принятая схематизация исходных условий исследуемого склона (оползневого участка) нередко может вызывать существенные отклонения от действительного механизма возникновения и развития оползневого процесса в коренном грунтовом массиве и приводить к неверной оценке его устойчивости и деформационного поведения.

Численные методы расчета устойчивости массива

При данном подходе рассматривается соотношение касательных напряжений и прочности грунта в каждой точке массива. То есть предполагается анализ полей прочности и касательных напряжений. При этом определяется коэффициент устойчивости K в точке массива по отношению прочности грунта (S) к значению максимального касательного напряжения (τ) (по потенциально опасной площадке сдвига):

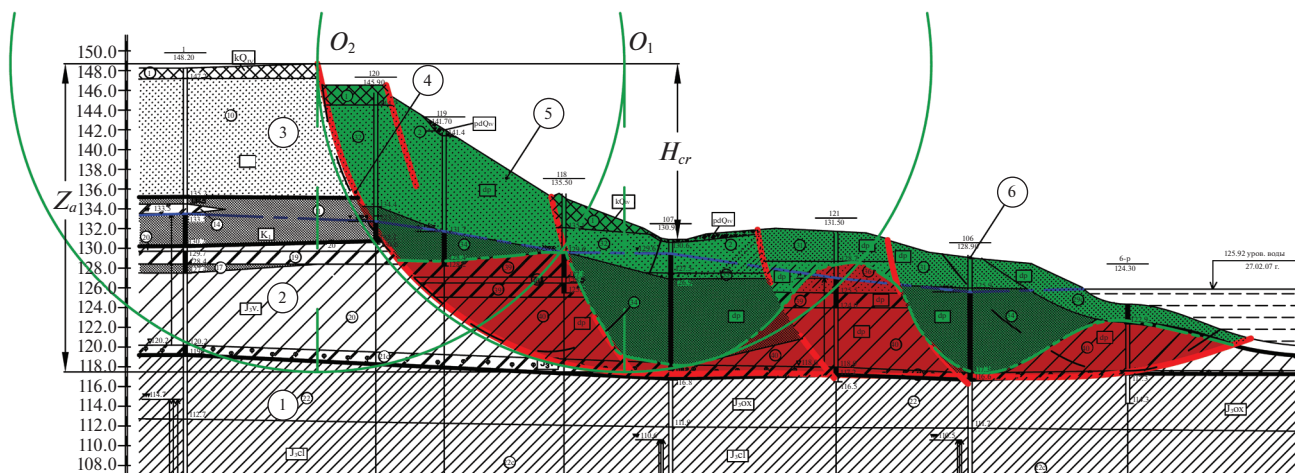


Рис. 2. Схематический инженерно-геологический разрез по центральному створу очага смещения нового оползневых блока на оползневом участке Хорошево (Москва) с выделением ДГС. 1 и 2 – соответственно глины волжского и оксфордского ярусов юрской системы; 3 – пески четвертичных отложений; 4 – поверхность скольжения; 5 – тело оползня; 6 – скважина. Границы ДГС показаны окружностями с центрами O_1 и O_2 .

$$K = \frac{S}{\tau} \quad (12)$$

Для построения поля прочности грунтов требуются многочисленные испытания грунтов на сдвиговые усилия с выделением и анализом инженерно-геологических элементов. Распределение касательных напряжений определяют путем расчетов, математического или физического моделирования, с учетом существующего напряженного состояния. Далее производится сопоставление прочности и касательных напряжений в точках на разрезе массива, выделение зон с пониженной устойчивостью, проявлением пластических деформаций и выбор на основе их анализа наиболее вероятной поверхности смещения.

Для решения рассмотренных выше задач расчета НДС склонов достаточно широко используются численные методы: метод конечных элементов (МКЭ), метод конечных разностей (МКР) и метод граничных элементов (МГЭ). Эти методы относятся к приближенным способам решения задач теории упругости. Разработаны специальные программы для выполнения расчетных процедур на ЭВМ. Оценка устойчивости склона также базируется на выявлении состояния в точках по (12). Однако точность численных решений не всегда в достаточной степени увязывается с существом физической задачи.

В существующих расчетных технологиях не учитывается изменение исходного НДС массива в связи с возникновением ДГС и образованием оболочки, в узкой зоне которой концентрируются высокие значения напряжений, а деформируются в условиях компрессионного сжатия до достижения критического состояния, в соответ-

ствии с (10), т.е. по величине смещения Δ_{cr} и углу поворота ДГС α_{cr} на горизонте базиса.

Пример активизации оползневых процессов на участке Хорошево

В 2006–2007 гг. в оползневом цирке с блоковым развитием деформаций на берегу р. Москва (участок Хорошево, г. Москва, Карамышевский проезд) произошла катастрофическая активизация оползневых процессов с образованием нового блока и перемещениями оползневых масс на протяжении 350 м по берегу. В связи с угрозой оползневых деформаций для жилых домов и действующего Храма Животворящей Троицы (архитектурный памятник XVI в.) были проведены инженерно-геологические изыскания и мониторинг деформаций склона и сооружений, в том числе инструментальные наблюдения за глубинными деформациями (инклинометрические и тензометрические измерения), в результате которых, в частности, была установлена основная поверхность скольжения (базис оползня) на глубине $Z_a = 31$ м (рис. 2).

В соответствии с результатами инженерно-геологических изысканий и обследования участка получены значения расчетных показателей для юрских глин оксфордского яруса: $c = 47.2$ кН/м²; $\varphi = 22^\circ$; среднее значение удельного веса грунтов над кровлей оксфордских глин $\gamma = 20$ кН/м³; $R = 180$ м – радиус кривизны бровки оползневых склона в плане; критическая высота стенки срыва (откоса коренного массива) перед активизацией оползня $H_{cr} = 16$ м.

Оценка состояния массива надоползневого уступа по схеме ДГС

Расчет предельного состояния с учетом ДГС по (9). Оценка условий формирования предельного состояния предполагает выявление реальных параметров ДГС и расчетных схем, в соответствии с исходными инженерно-геологическими и геоморфологическими условиями участка, анализом действующих экзогенных геологических процессов и определением базиса процесса. Подставляя исходные данные, указанные выше, в формулу (9) получим: $Z_a = 31.8$ м. То есть имеет место практически полное совпадение результатов расчета Z_a и фактических измерений по глубинным устройствам на оползне.

Таким образом, технология оценки состояния массива на основе анализа ДГС позволяет определять местоположение потенциально деформирующегося горизонта (базиса диссипации) в оползнеопасном коренном грунтовом массиве, используя данные обследования участка и ограниченные сведения о геологическом строении и физико-механических свойствах слагающих массивов грунтов, и получать необходимую информацию для проведения расчетов устойчивости и проектирования необходимых защитных мероприятий в целях обеспечения безопасного функционирования инженерных сооружений. Z_a является основным параметром ДГС. Для построения ДГС на разрезе по центральному створу (см. рис. 2, окружности с центрами O_1 и O_2) использовано положение трещины закола, обозначающей проявление тыловой границы ДГС-блока с центром O_1 , и базиса диссипации [7].

Допредельное смещение ДГС-блока. В соответствии с результатами теоретических исследований толщина оболочки ДГС на данном участке составляет $h = 0.009Z_a = 0.29$ м. Следовало бы ожидать, что отделение ДГС-блока должно было начаться, когда его смещение на допредельном этапе достигнет, согласно (10), $\Delta_{cr} = h = 0.009Z_a = 0.29$ м.

Но на этапе подготовки оползневого блока мониторинг состояния массива еще не проводился. Однако коммунальные службы жилых домов осуществляли оперативные наблюдения за деформациями по образовавшейся трещине закола по двум маркам с сентября 2006 г. Уже за 10 сут конца сентября – начала октября амплитуда вертикального смещения по трещине составила 0.16 м. Далее скорость оседания ДГС-блока замедлилась. Но ДГС-блок на этот момент составлял единое целое с коренным массивом; при этом прочность структурных связей в грунтах оболочки сохранялась. Интенсивное оседание ДГС-блока с образованием поверхности скольжения (основ-

ное смещение) началось в январе 2007 г., а в феврале высота новой стенки срыва достигла 3 м.

Дополнительные примеры активизации оползневого процесса

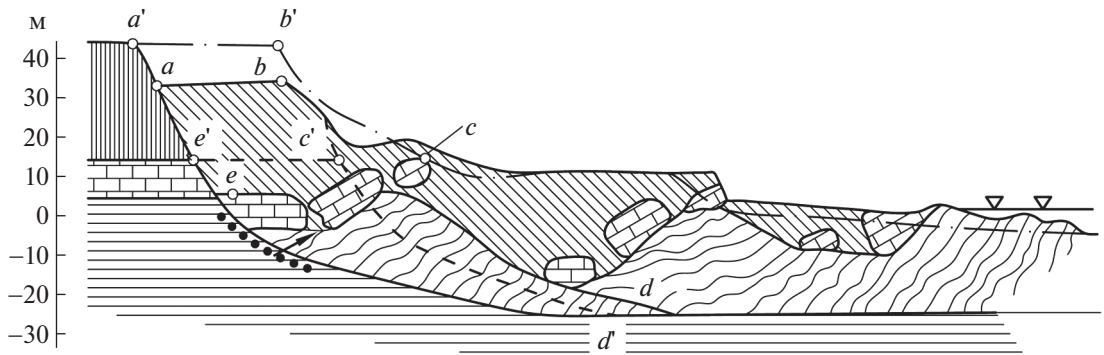
Поведение коренного массива надоползневого уступа при подготовке нового оползневого блока можно также рассмотреть на примере оползневого участка в Одессе. На одесском побережье получили распространение типичные блоковые оползни сжатия-выдавливания. По описанию П.Н. Науменко [3], на участке XII амфитеатра в 1964 и 1965 г. произошло образование новых оползневых блоков.

Протяженность амфитеатра по берегу 990 м, высота бровки берегового склона над морем в центральной части амфитеатра 42–43 м. Геологический разрез склона типичен для морского побережья Одессы (рис. 3).

В июле 1965 г. к юго-западу от блока, отчленившегося в 1964 г., на плато появилась трещина растяжения, превратившаяся затем в трещину закола нового оползневого блока. Отделение и оседание блока произошло 14.12.1965 г. За развитием деформаций по трещине и смещением формирующегося блока проводились геодезические наблюдения в период до его отделения по 10.12.65 г. Осадка блока за указанный период составила 0.59 м, а горизонтальные смещения – 0.22 м [3]. В соответствии с этими данными результирующее смещение на момент отделения блока достигло 0.63 м (спустя более 4 мес. с проявления трещины закола на поверхности плато). Глубина до базиса оползания блока на участке $Z_a \approx 70$ м (см. рис. 3). В соответствии с технологией оценки состояния массива на основе анализа ДГС по (10), $\Delta_{cr} = 0.009Z_a \approx 0.63$ м. То есть в данном случае имеет место полное совпадение расчетных и фактических данных.

Ранее П.Н. Науменко в работе [2] представил результаты мониторинга развития оползневых смещений в 1963 г. на III амфитеатре побережья Одессы. Там также были проведены наблюдения на этапе подготовки оползневого блока до его отделения от плато. По центральному створу до отделения блока его результирующее смещение (включая вертикальные и горизонтальные составляющие) составило 0.52 м. Параметр Z_a , согласно представленным данным, находился в интервале 58–59 м, следовательно, и смещение нового оползневого блока началось после достижения $\Delta_{cr} = 0.009Z_a \approx 0.52$ м. То есть и в данном случае теоретические результаты хорошо подтверждаются натурными наблюдениями.

Таким образом, выявленные количественные критерии допредельного деформирования ДГС универсальны и проявляются в любых условиях



Отметки, м (1964 г.)	42.9	31.4	33.2	34.2	17.0	19.6	10.5	10.4	11.2	2.2	0.1	0.9	1.1
Расстояния, м	20	20	6	20	11	17	22	33	20	22	8	11	12



Рис. 3. Геологический разрез по центральному створу участка после образования и смещения нового оползневого блока в XII амфитеатре берега моря в г. Одессе 29.02.1964 г., по П.Н. Науменко [3]. *a'b'c'd'e'* – положение блока (массива) нового закола до подвижки 29.02.1964 г.; *e'e'* – положение кровли известняков до оползания; *abcde* – положение соответствующих точек блока нового закола после оползания; 1 – лессовые отложения плейстоценового возраста (Q_{I-II}), 2 – известняки понтического яруса (N_{2pn}), 3 – глины меотического яруса (N_{1m}) в несмещенном залегании (плиоценовые отложения мощностью 1.7 м, залегающие на кровле известняков, на разрезе не показаны); 4–6 – те же породы в смещенном состоянии; 7 – объем меотических глин, выдавленных из приподошвенной зоны нового закола; 8 – профиль склона до подвижки 29.02.1964 г.; 9 – уровень моря.

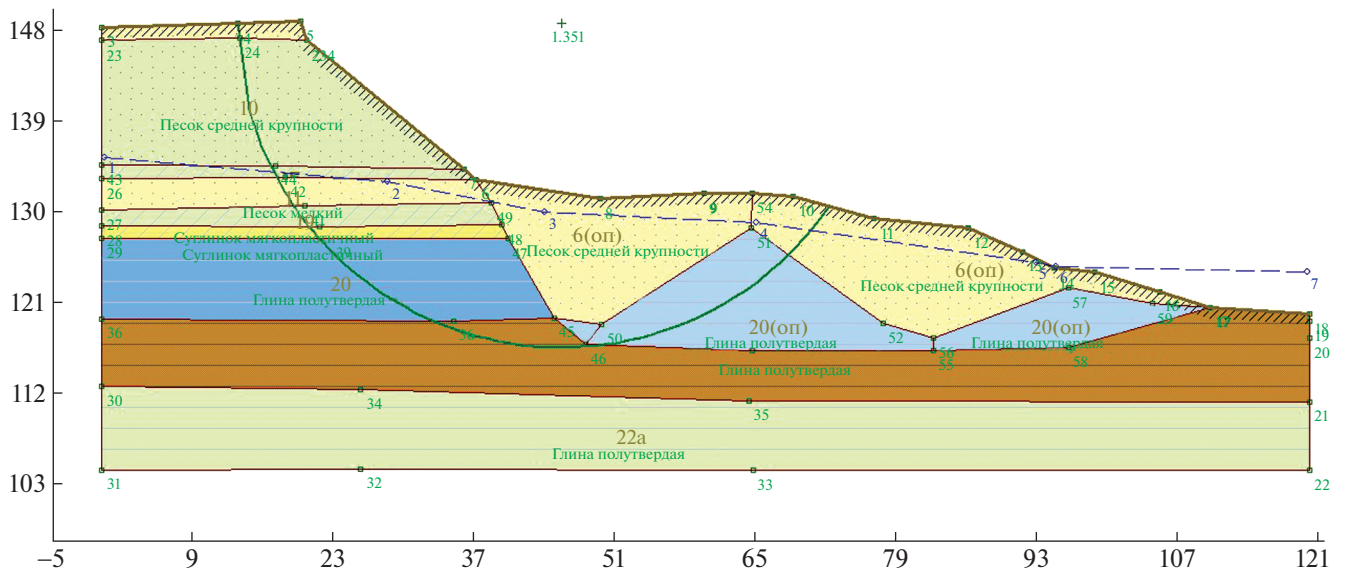


Рис. 4. Расчетный разрез опытного участка Хорошево-1 для выполнения расчетов в программе “Geostab”.

при подготовке нового оползневого блока, как в естественных условиях на береговых склонах, так и на техногенных образованиях (карьеры, отвалы [2]). Параметры ДГС-блока, его границы, в том числе внутренние связи между ДГС, также подтверждаются фактическими данными мониторинга активизации оползневого процесса на участке Хорошево [7].

Сопоставительные оценки состояния коренного массива надоползневого уступа при образовании нового оползневого блока

1. Расчет устойчивости блока по схеме сдвига в программе “Geostab” на момент его отделения (рис. 4).

ПС – окружность с центром O_1 . Положение блока до отделения от плато (площадка блока на

уровне плато). По ПС сопротивление сдвигу по пиковым значениям характеристик прочности грунта (расчетным значениям), в том числе и для оползневого массива. Расчеты дали значение коэффициента устойчивости по описанной схеме: $K = 1.75$.

Расчет с учетом образования ДГС. До отделения ДГС-блок – одно целое с коренным массивом. Прочность грунтов в оболочке характеризуется пиковыми значениями. Структурные связи в грунтах оболочки не нарушены. Расчетное положение ПС – оболочка радиусом Z_a . Массивы вне пределов данной ПС не участвуют в расчетах. По (9) – предельное состояние, т.е. высота надползневого уступа составляет H_{cr} . С учетом сохранения исходной прочности грунтов, принимая по допредельному смещению блока в соответствии с (11) $K_{zi} = \Delta_{cr}/\Delta_i > 1$, следует, что устойчивость блока обеспечивается, $K > 1$.

2. Расчет устойчивости оползневого массива в программе “Geostab” на момент положения блока с площадкой на уровне плато.

Принято, что поверхность скольжения в расчетной схеме – дуга окружности с центром O_1 до точки пересечения нормали из O_1 с базисом и далее по ПС массива (оболочка ДГС-блока). Характеристики прочности грунтов в зоне смещения по дуге окружности ПС имеют пиковые значения, по горизонтальной ПС – значения из испытаний на второй сдвиг по схеме “плашка по плашке”. Расчетное значение $K = 1.35$.

Расчет с учетом образования ДГС. При отделении ДГС-блока оползневой склон (ниже фронтальной границы ДГС-блока) не участвует в процессе подготовки блока и не влияет на его устойчивость. Смещение (вращательное) происходит по оболочке ДГС-блока. ПС в расчетах – окружность радиусом $Z_a = 31$ м. В данном случае, как и в п. 1, ДГС-блок является частью коренного массива (пиковые значения характеристик прочности грунтов). ПС с разрывом структурных связей отсутствует. Соответственно по допредельным смещениям ДГС-блока $K_{zi} = \Delta_{cr}/\Delta_i > 1$. Как и в п. 1 $K > 1$. Состояние массива надползневого уступа в пределах ДГС-блока устойчивое.

3. Поиск опасной криволинейной поверхности отделения блока в программе “Geostab” (положение в разрезе и очертания) по расчетной схеме из п. 2. Значения характеристик прочности по п. 2. Расчетное значение $K = 1.13$.

Расчет с учетом образования ДГС. Как и в п. 2, в расчетной схеме по п. 3 (в программе “Geostab”) рассматривается весь склон вместе с поверхностью отделения, полученной в режиме поиска. Замечания те же, что и в п. 2. В исходном состоянии, когда блок является частью коренного массива и характеристики прочности грунтов по

ожидаемой расчетной ПС имеют пиковые значения, устойчивость блока с установленным базисом оползания обеспечивается. Допредельные значения поворота ДГС-блока и смещения, как результат скашивания грунтов в оболочке, находятся в допустимых пределах, т.е. $K_{zi} = \Delta_{cr}/\Delta_i > 1$. Следовательно, устойчивость ДГС-блока на данный момент обеспечивается, $K > 1$.

4. Расчет устойчивости нового оползневого блока в программе “Geostab” с учетом криволинейной ПС (окружность радиусом $Z_a = 31$ м, с центром O_1 , см. рис. 3).

Принято: в грунтах зоны смещения $\sigma_{str} = 0$ (момент отделения блока после преодоления предельного состояния). По программе “Geostab” получено $K = 0.84$.

Расчет с учетом образования ДГС по условиям п. 4. Как указано выше, отделение ДГС-блока и его оседание начинается, когда состояние по уравнению (9) предельное, и достигается критерий по деформации ДГС-блока по (10), т.е. высота надползневого уступа $H_i = H_{cr} = 16$ м. При этом достигается также критическая величина допредельного смещения ДГС-блока $\Delta_i = \Delta_{cr} = 0.009Z_a$. Для условий рассматриваемого участка Хорошево $\Delta_{cr} = 0.009Z_a = 0.29$ м. Действительно, в момент отделения ДГС-блока процесс скашивания грунтов в оболочке достигает предельного состояния, структурные связи разрушаются, обрывается поверхность скольжения по всей оболочке. ДГС-блок становится оползневой. С учетом возникновения неуравновешенного момента сдвигающих сил коэффициент устойчивости $K = (Z_a - H_{cr})/Z_a \approx 0.5$ (при $\sigma_{str} = 0$ и превращении ДГС-блока в оползневой массив). По двум критериям (9) и (11) имеет место запредельное состояние по устойчивости массива, $K_3 \leq 1$ и $K \ll 1$.

Таким образом, расчеты устойчивости массива надползневого уступа по программе “Geostab” с допущением исходных пиковых значений характеристик прочности грунтов по ожидаемой поверхности скольжения дают расчетное значение коэффициента устойчивости выше единицы, как и в схемах с рассмотрением состояния массива надползневого массива вместе со всем склоном. Коэффициент устойчивости значением меньше единицы получается, когда, в соответствии с механизмом функционирования ДГС, принимается, что поверхность отделения блока – окружность радиусом $Z_a = 31$ м, сцепление $c = 0$ и структурная прочность грунтов в зоне смещения $\sigma_{str} = 0$. При этом должны быть соблюдены условия, определяющие предельное состояние рассматриваемого массива: $H_i = H_{cr} = 16$ м, соответственно равновесие по уравнению (9); $\Delta_i = \Delta_{cr} = 0.009Z_a$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены сопоставительные оценки состояния коренного массива надолгоупадающего уступа при образовании в нем нового оползневого блока с использованием программы “Geostab” и технологии оценки состояния массива при формировании и отделении ДГС в соответствии с критериями (9)–(11). Традиционные расчетные технологии оценки состояния оползнеопасного массива и изучения НДС включают подбор (поиск) схемы расчета (положение и очертание ПС, расчетные величины прочности грунтов в зоне ПС, влияние подземных вод и т.д.).

Оценка состояния массива с учетом формирования в нем ДГС основана на выявлении ПС, как граничной поверхности объективно существующей ДГС, в соответствии физико-геологическими закономерностями трансформации исходного НДС массива при локальном воздействии на него оползневого очага. При этом расчет производится по сечению в центральном створе участка подготовки блока, а ПС представляет собой окружность радиусом Z_a .

Как показали результаты натурных наблюдений на участках Хорошево (Москва) и оползневых амфитеатров Одессы, отделение оползневого блока происходит спустя около 4 мес. после образования трещины закола на плато. То есть до достижения критического значения смещения грунта по (10), блок является частью коренного массива, и его устойчивость обеспечивается ($K_f > 1$). Отделение блока от коренного массива надолгоупадающего уступа связано с разрывом структурных связей, и в расчетах необходимо учитывать изменения прочности грунта в зоне смещения ($c = 0$; $\sigma_{str} = 0$), а также очертание ПС в виде окружности радиусом Z_a . Оползневой склон, расположенный ниже, не участвует в оценке устойчивости нового оползневого блока.

Расчеты показали, что учет закономерностей, выявленных на этапе подготовки образования нового оползневого блока на основе анализа формирования и функционирования ДГС (очертание поверхности скольжения, динамика прочности грунтов и др.), позволяет повысить достоверность расчетной процедуры. Следует отметить, что при отделении блока как ДГС и разрушении структурных связей грунтов по ее оболочке возникает момент сил с плечом Z_a (что не учитывается в традиционных расчетах), устойчивость отделяющегося блока резко падает, и происходит его осадка на метры и более.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Демин А.М. Оползни в карьерах: анализ и прогноз. М.: ГЕОС, 2009. 79 с.
2. Науменко П.Н. Закономерности развития и механизм катастрофических оползневых смещений на Одесском побережье // Вопросы изучения оползней и факторов их вызывающих. М.: Труды ВСЕГИНГЕО, 1968. Вып. 8. С. 42–59.
3. Науменко П.Н. Условия формирования и инженерно-геологическая характеристика оползней Черноморского побережья Одессы // Оползни Черноморского побережья Украины. М.: Недра, 1977. С. 57–100.
4. Постоев Г.П. Предельное состояние и деформации грунтов в массиве (оползни, карстовые провалы, осадки грунтовых оснований). М.; СПб: Нестор-История, 2013. 100 с.
5. Постоев Г.П. Диссипативные структуры в грунтовом массиве на примере формирования глубоких оползней // Инженерная геология. 2018. Т. XIII. № 3. С. 54–61.
6. Постоев Г.П., Кучуков М.М., Казеев А.И. Физические законы распределения давления в геологической среде // Геоэкология. 2020. № 6. С. 22–31.
7. Постоев Г.П., Кучуков М.М., Казеев А.И. Геологические закономерности образования диссипативных геологических структур – оползневых блоков // Геоэкология. № 4. С. 32–40.

PECULIARITIES OF SLOPE STABILITY CALCULATIONS UPON THE FORMATION OF A NEW LANDSLIDE BLOCK

G. P. Postoev^{a,*}, A. I. Kazeev^a, and M. M. Kuchukov^a

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

^{*} *E-mail: opolzen@geoenv.ru*

Upon preparation of a new landslide block in the bedrock massif, the dissipative geological structures (DGS) appear in accordance with physical and geological regularities of geoenvironment functioning in the source area of landslide development. Separation of the block occurs as DGS detachment along its boundary (shell) with breaking of structural bonds in soil and subsequent rotational displacement of DGS-block (within the shell) along the resulting sliding surface as a landslide massif. The comparative calculations of massif condition assessment in preparation of the block as DGS and by existing methods of stability calculation (in particular, in the program Geostab) were analyzed. The use of the mechanism and regularities of the DGS block

preparation in the assessment of the massif state allows increasing the accuracy and reliability of the calculation procedures.

Keywords: *dissipative geological structures, stress-strain patterns, limit state, stability criteria, stability calculations, DGS and shear schemes*

REFERENCES

1. Demin, A.M. *Opolzni v kar'erakh: analiz i prognoz* [Landslides in open-cut mines: analysis and forecast]. Moscow, GEOS Publ., 2009, 79 p. (in Russian)
2. Naumenko, P.N. *Zakonomernosti razvitiya i mekhanizm katastroficheskikh opolznykh smeshchenii na Odesskom poberezh'e* [Development regularities and mechanism of catastrophic landslide displacement on the Black Sea coast near Odessa]. *Voprosy izucheniya opolznei i faktorov ikh vyzyvayushchikh. Trudy VSEGIN-GEO* [Issues of studying landslides and inducing them factors. Proc. VSEGINGEO]. 1968, is. 8, pp. 42–59. (in Russian)
3. Naumenko, P.N. *Usloviya formirovaniya i inzhenerno-geologicheskaya kharakteristika opolznei Chernomorskogo poberezh'ya Odessy* [Formation conditions and engineering geological characteristics of landslides at the Black Sea coast of Odessa]. *Opolzni Chernomorskogo poberezh'ya Ukrainy* [Landslides at the Ukrainian coast of the Black Sea]. Moscow, Nedra Publ., 1977, pp. 57–100. (in Russian)
4. Postoev, G.P. *Predel'noe sostoyanie i deformatsii gruntov v massive (opolzni, karstovye provaly, osadki gruntovykh osnovanii)* [The limit state and deformations of soils in the massif (landslides, karst sinkholes, ground basement settlement)]. Moscow, St. Petersburg, Nestor-Istoriya Publ., 2013, 100 p. (in Russian)
5. Postoev, G.P. *Dissipativnye struktury v gruntovom massive na primere formirovaniya glubokikh opolznei* [Dissipative structures in the soil massif by the example of deep landslides formation]. *Inzhenernaya geologiya*, 2018, vol. XIII, no. 3, pp. 54–61. (in Russian)
6. Postoev, G.P., Kazeev, A.I., Kuchukov, M.M. *Fizicheskie zakony raspredeleniya davleniya v geologicheskoi srede* [Physical laws of stress distribution in the geoenvironment]. *Geoekologiya*, 2020, no. 6, pp. 22–31. (in Russian)
7. Postoev, G.P., Kuchukov, M.M., Kazeev, A.I. *Geologicheskie zakonomernosti obrazovaniya dissipativnykh geologicheskikh struktur – opolznykh blokov* [Geological regularities of formation of dissipative geological structures – landslide blocks]. *Geoekologiya*, 2021, no. 4, pp. 32–41. (in Russian)