

ISSN 0869-7809

Номер 6

Ноябрь–Декабрь 2024



# ГЕОЭКОЛОГИЯ

Инженерная геология  
Гидрогеология  
Геокриология



НАУКА

— 1727 —

# СОДЕРЖАНИЕ

---

Номер 6, 2024

---

Континентальные эколого-геологические системы массивов гидротермальных  
грунтов южной Камчатки

*В. А. Королев, Ю. В. Фролова*

3

## ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

Вероятностно-статистическая оценка карстово-суффозионной опасности  
и риск разрушения провалами главных объектов Нижегородской  
атомной электростанции (НИАЭС)

*А. В. Аникеев*

15

## ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ ПРИРОДНЫХ И ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Особенности изменения геокриологических условий на участке  
федеральной автомобильной дороги “Амур” Чита–Хабаровск

*А. Н. Хименков, А. П. Кулаков, А. В. Романов, Д. О. Сергеев*

25

## МОДЕЛИ В ИНЖЕНЕРНОЙ ГЕОЛОГИИ И ГИДРОГЕОЛОГИИ

Возможность количественного определения динамических параметров  
оползневых процессов термоабразионных берегов в криолитозоне на основе  
анализа морфологической структуры по однократной космической съемке

*А. С. Викторов*

35

Геофильтрационное моделирование для обоснования безопасной отработки  
Яковлевского железорудного месторождения КМА

*П. А. Рыбников, Л. С. Рыбникова*

43

## ГРУНТОВЕДЕНИЕ И МЕХАНИКА ГРУНТОВ

Оценка взаимодействия составляющих композитной модели “грунт–цементный материал”

*В. Н. Кутергин, Ф. С. Карпенко, С. И. Фролов*

58

## ЗАГРЯЗНЕНИЕ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

Эколого-геохимическая оценка системы “водоток и его водосбор”  
малой р. Полежаевка (бассейн р. Амур)

*Л. А. Гаретова, Е. Л. Имранова, Н. К. Фишер, А. М. Кошельков*

67

Геохимические формы нахождения тяжелых металлов и их распределение  
в отходах обогащения сульфидсодержащих руд (на примере Джидинского  
вольфрамово-молибденового комбината, Бурятия)

*Б. В. Дампилова*

78

## УТИЛИЗАЦИЯ И ЗАХОРОНЕНИЕ ОТХОДОВ

Геоэкологические и инженерно-геологические особенности пород зоны аэрации,  
загрязненных углеводородами

*К. Л. Чертес, А. А. Лаврусевич, В. Н. Пыстин, О. В. Тупицына, А. Д. Пашков*

89

---

# CONTENTS

---

---

**Number 6, 2024**

---

---

Continental ecological-geological systems of hydrothermal soils massifs of south Kamchatka  
*V. A. Korolev, Yu. V. Frolova* 3

---

## NATURAL AND TECHNONATURAL PROCESSES

Probabilistic-statistical assessment of karst and suffosion hazard and risk  
of destruction by sinkholes of the main facilities at the Nizhny Novgorod NPP  
*A. V. Anikeev* 15

---

## FUNCTIONING OF NATURAL AND NATURAL ANTHROPOGENIC SYSTEMS

Peculiarities in changes of geocryological conditions on the section  
of the federal highway «Amur» Chita–Khabarovsk  
*A. N. Khimenkov, A. P. Kulakov, A. V. Romanov, D. O. Sergeev* 25

---

## MODELS IN ENGINEERING GEOLOGY AND HYDROGEOLOGY

Possibility of quantitative determination of dynamic parameters of landslide processes  
for thermoabrasion shores in cryolithozone based on morphological pattern analysis  
by single space imagery  
*A. S. Victorov* 35

Groundwater flow modeling to justify safe mining of the Yakovlevsky iron ore deposit (KMA)  
*P. A. Rybnikov, L. S. Rybnikova* 43

---

## SOIL AND ROCK ENGINEERING AND MECHANICS

Assessing interaction between the components in the soil–cement composite model  
*V. N. Kutergin, F. S. Karpenko, S. I. Frolov* 58

---

## ENVIRONMENT CONTAMINATION

Ecological and geochemical assessment of waterflow and its watershed system  
of Polezhaevka small river (Amur river basin)  
*L. A. Garetova, E. L. Imranova, N. K. Fisher, A. M. Koshelkov* 67

Heavy metals and their forms of occurrence in sulfide-containing  
ore beneficiation waste (Buryatia)  
*B. V. Dampilova* 78

---

## UTILIZATION AND DISPOSAL OF WASTE

Geocological and engineering geological specifics of washing geoenvironment  
from hydrocarbon pollution  
*K. L. Chertes, A. A. Lavrusevich, V. N. Pystin, O. V. Tupitsina, A. D. Pashkov* 89

---

---

УДК 502/504+624.131

## КОНТИНЕНТАЛЬНЫЕ ЭКОЛОГО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ МАССИВОВ ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ ГРУНТОВ ЮЖНОЙ КАМЧАТКИ

© 2024 г. В. А. Королев<sup>1,\*</sup>, Ю. В. Фролова<sup>1,\*\*</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,  
Ленинские горы 1, Москва, 119991 Россия

\*E-mail: va-korolev@bk.ru

\*\*E-mail: ju\_frolova@mail.ru

Поступила в редакцию 24.04.2024 г.

После доработки 11.09.2024 г.

Принята к печати 10.10.2024 г.

Выявлены основные особенности широко распространенных в вулканических областях Земли континентальных эколого-геологических систем (ЭГС) массивов гидротермальных грунтов локального уровня на примере одного из термальных полей юга Камчатского полуострова – Восточно-Паужетского геотермального поля. Проанализированы абиотические и биотические компоненты данных ЭГС. Установлены специфические черты литотопов рассматриваемых ЭГС, представленных массивами гидротермально-метасоматических грунтов с определенным рельефом и характерным гидротопом, а также развитыми в их пределах геохимическими, геодинамическими и геофизическими полями. Литотопы в свою очередь обуславливают специфические эдафотопы на их поверхности, а также развитие своеобразных биоценозов: термофильных микробиоценозов, сообществ характерных растений и животных термофилов. Для ЭГС массивов гидротермальных грунтов характерна горизонтальная зональность, проявляющаяся во всех их компонентах и обусловленная, прежде всего, наличием зональности температурной аномалии в рассматриваемых гидротермах. Основным определяющим фактором формирования специфических особенностей данной ЭГС является своеобразие ее литотопа, представленного массивом гидротермально-метасоматических грунтов, обладающего вертикальной и горизонтальной зональностью. Выявленные особенности в составе и структуры анализируемой ЭГС необходимо учитывать при инженерно-экологических исследованиях и инженерно-экологических изысканиях на аналогичных объектах.

**Ключевые слова:** эколого-геологическая система, термальное поле, литотоп, эдафотоп, микробиоценоз, фитоценоз, зооценоз, гидротермальные грунты, метасоматоз, термофилы

DOI: 10.31857/S0869780924060013 EDN: AMGJYS

### ВВЕДЕНИЕ

Гидротермы, т.е. горячие водные растворы, мигрирующие в земной коре, широко распространены на Земле как в океанических, так и в континентальных областях. Первые формируют аквальные гидротермальные экосистемы, а вторые образуют континентальные (или сухопутные) экосистемы. Массивы континентальных гидротермальных грунтов приурочены к районам активного вулканизма и представляют собой сложно построенные толщи, формирующиеся в пределах гидротермальных систем (ГТС) под воздействием флюидов с температурой до 400°C. Они широко распространены как в нашей стране (Камчатка, Курилы, Сахалин, Чукотка, Кавказ, Прибайкалье, Приморье и др.), так и зарубежом (Исландия, Эфиопия, Новая Зеландия, США, Япония, Индонезия, Китай, Турция, Италия и др.) [12].

Гидротермальные системы, как правило, приурочены к вулcano-тектоническим депрессиям или склонам вулканических массивов, сложенным вулcanoгенными и вулcanoгенно-осадочными

отложениями. Интенсивно трещиноватые, хорошо проницаемые породы являются вмещающим подземных вод, которые нагреваются аномально высоким тепловым потоком. В качестве источников тепла рассматриваются остывающие интрузивные и субвулканические тела, магматические очаги, зоны разломов и иные [2]. Согласно современным представлениям, ГТС представляют собой конвективные ячейки, в пределах которых циркулируют воды метеорного происхождения. Проникая по порам и трещинам на значительные глубины, они нагреваются, смешиваются с магматическими эманациями (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, NH<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>S, В, Hg, парами HCl и др.) и поднимаются к поверхности, взаимодействуя на своем пути с вмещающими их породами. Эти процессы кардинально меняют облик материнских пород как в недрах, так и на поверхности в зонах разгрузки гидротерм и приводят к формированию гидротермально-метасоматических пород.

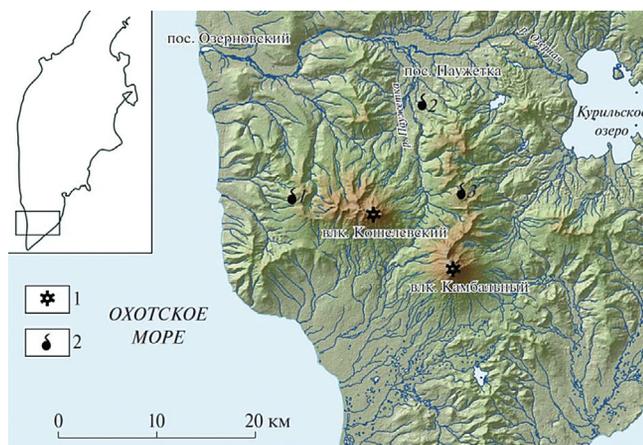
Характерной особенностью гидротермально измененных толщ является вертикальная

зональность, распространяющаяся от поверхности до глубины первых километров. Ее формирование обусловлено сменой термодинамических условий и дифференциацией гидротерм по мере их подъема к поверхности [13]. Обобщенная схема включает следующие зоны (снизу вверх): 1) вторичных кварцитов (кварц, серицит); 2) пропилитизации (альбит, хлорит, кальцит, серицит, эпидот); 3) фельдшпатиизации (кварц, адуляр, серицит); 4) цеолитизации (ломонтит, хлорит, корренсит, кварц и др.); 5) аргиллизации (смектиты, высококремнистые цеолиты); 6) сернокислотного выщелачивания (опал, каолинит, алуниит, гидроксиды железа). Наряду с этим формируется и широтная зональность (в плане), которая, однако, изучена в меньшей степени [23].

Указанные особенности гидротермальных массивов приводят к тому, что на их поверхности формируются специфические эколого-геологические системы (ЭГС), существенно отличающиеся от окружающих. Их основными компонентами являются эдафотопы (представленные термоземами), микробоценозы (состоящие из микроорганизмов-термофилов), а также термальные фито- и зооценозы. При этом литогенной основой такой ЭГС являются литотопы массивов гидротермальных метасоматических грунтов.

Несмотря на то, что опубликовано множество работ по геологии термальных полей, по характеристике их почв, микробных сообществ, растительности и животного мира, обобщающие работы по оценке их экосистем или эколого-геологических систем отсутствуют.

**Цель** настоящей статьи — выявление общих особенностей континентальных (сухопутных) эколого-геологических систем элементарного иерархического уровня массивов гидротермальных грунтов.



**Рис. 1.** Расположение ЭГС массивов гидротермальных грунтов на юге Камчатского полуострова (по [19]): 1 — действующие вулканы; 2 — термальные поля: 1 — Нижне-Кошелевское, 2 — Восточно-Паужетское, 3 — Южно-Камбальное Центральное.

Исследование выполнено на примере термальных полей юга Камчатского полуострова, причем наиболее детально изучено Восточно-Паужетское поле (рис. 1). Результаты исследования получены на основе личных материалов, полученных в ходе полевых работ в сезоны 1989–1990, 2005, 2017 и 2022 г., значительная часть которых проходила в рамках совместных работ с лабораторией геотермии ИВиС ДВО РАН, а также на основе обобщения опубликованных источников по данному району.

## ЭКОЛОГО-ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ СИСТЕМА МАССИВА ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ ГРУНТОВ ВОСТОЧНО-ПАУЖЕТСКОГО ТЕРМАЛЬНОГО ПОЛЯ

Восточно-Паужетское термальное поле относится к Паужетско-Камбальному району в пределах Восточного вулканического пояса Камчатки.

### Особенности абиотических компонентов

Абиотические компоненты ЭГС массивов гидротермальных грунтов представлены литотопом и эдафотопом.

**Особенности литотопа** ЭГС массива гидротермальных грунтов Восточно-Паужетского поля обусловлены сложным геологическим строением территории, представляющей собой посткальдерную вулканическую постройку четвертичного возраста, в пределах которой интенсивно проявлена гидротермальная деятельность.

К характеристикам литотопа данной ЭГС относятся состав и строение грунтового массива, особенности его рельефа, гидротопы, а также геохимические, геодинамические и геофизические поля [22].

Геологическое строение Паужетской ГТС достаточно хорошо изучено [1, 2, 5, 21]. Вмещающими породами рассматриваемого литотопа являются вулканогенно-осадочные, в меньшей степени — вулканогенные отложения неоген-плейстоценового возраста, существенно измененные под действием термальных флюидов в условиях низкотемпературной пропилитизации и аргиллизации.

Поле расположено на северо-западном склоне Камбального вулканического хребта на высоте около 300 м над уровнем моря. Оно имеет вытянутую в субширотном направлении форму с линейными размерами порядка 350 × 100 м (рис. 2).

По данным [17], размеры Центрального участка составляют 100 × 200 м по 20-градусной изотерме, проведенной на глубине 0.6–0.8 м. Наиболее прогретая площадь размером 60 × 120 м выделяется парящими грунтами (до 105°C на глубине 0.6–0.8 м), парогазовыми струями (от 100



**Рис. 2.** Эколого-геологическая система Восточно-Паужетского термального поля (фото Ю.В. Фроловой): а – общий вид, б – парогазовая струя, в – грязевой котел, г – разгрузка термальных вод на удалении от термального поля.

до 108–109°C на устьях), грязеводными кипящими котлами и мелкими теплыми озерами. На удалении 150–200 м от Центрального участка вниз и вверх по ручью отмечаются отдельные термальные площадки с грязеводными котлами.

Следует отметить, что термальное поле характеризуется естественным термодинамическим режимом, поскольку находится на удалении 1–2 км от эксплуатируемых участков месторождения, в отличие от других полей, которые за период эксплуатации (с 1966 г.) изменились из-за падения уровня термальных вод (исчезли гейзеры, остыли и покрылись растительностью крупные участки разгрузки гидротерм).

Роль *гидротона* в рассматриваемой ЭГС весьма значительна. Приповерхностные термальные воды, разгружающиеся на Восточно-Паужетском поле, представляют собой конденсаты вторичного пара, генетически связанного с глубинными растворами [5, 7]. По составу разгружающиеся воды кислые сульфатные и слабокислые гидрокарбонатно-сульфатные с широким катионным составом, общая минерализация не превышает 0.8 г/л. Глубинные воды нейтральные до щелочных

хлоридно-натриевые и хлоридно-гидрокарбонатные. В катионном составе преобладают натрий и кальций, присутствуют аммоний, бор [17]. Гидрохимические особенности флюидов обуславливают специфическое *геохимическое поле* в пределах рассматриваемой ЭГС.

ГТС относится к вододоминирующему типу. В ее строении выделяются два водоносных горизонта на глубинах 100–350 м и 500–750 м, приуроченные к толщам крупнообломочных туфов. Они подстилаются, разделяются и перекрываются тремя водоупорными комплексами пород. За счет разгрузки гидротерм в зонах повышенной проницаемости, на дневной поверхности сформировано несколько термальных полей, одно из которых — Восточно-Паужетское поле. Следует отметить, что в пределах Паужетской ГТС на поверхность выходят преимущественно тонко-мелкообломочные туфогенные породы, которые интенсивно преобразуются под действием разгружающихся гидротерм. Однако на отдельных участках туфы перекрыты лавовыми потоками андезит-андезитобазальтового состава. Именно на таком участке образовано Восточно-Паужетское гидротермальное поле.

Под действием химически активных термальных вод и пара исходные андезиты подвергаются аргиллизации, в ходе которой их первичные компоненты (плаггиоклазы, пироксены, вулканическое стекло) замещаются преимущественно глинистыми минералами и минералами кремнезема, при участии карбонатов, цеолитов, пирита и иных вторичных образований [15, 17]. В результате гидротермальной деятельности в разрезе термального поля сформировались три горизонта (снизу вверх): аргиллизированные андезиты, метасоматические брекчии и гидротермальные глины (мощностью от 1.5 до 6 м) [3, 17]. Мощности всех слоев крайне изменчивы, что связано с первичной неоднородностью и различной проницаемостью пород, слагающих термальное поле.

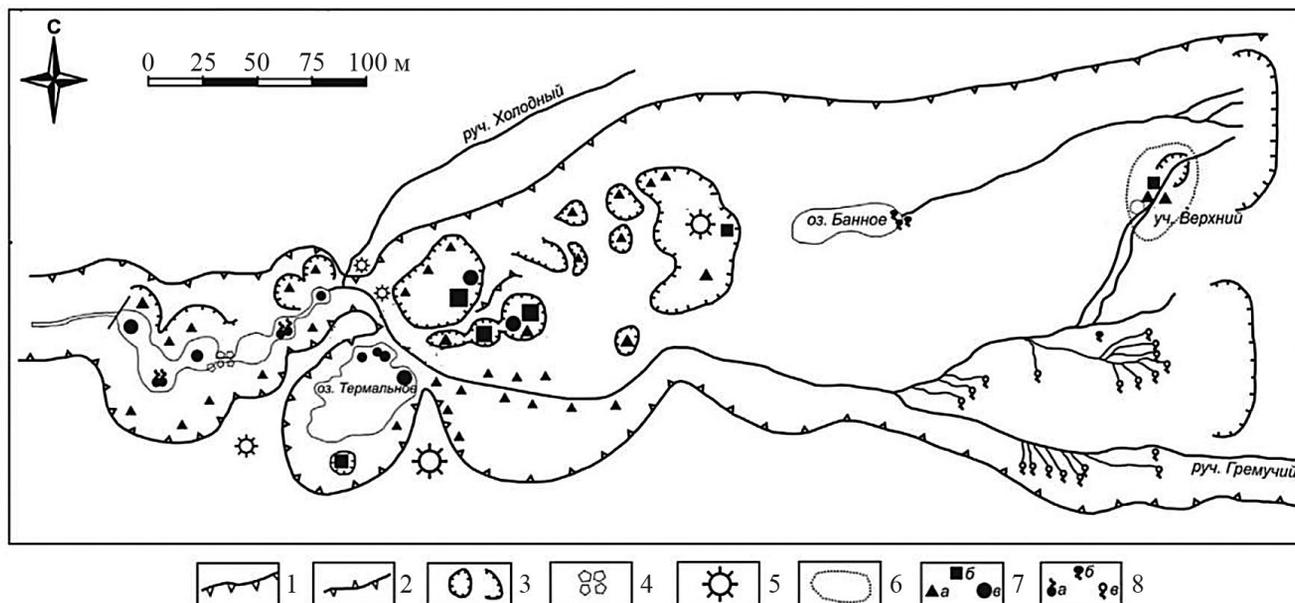
Исходные андезиты представляют собой плотные, низкопористые, прочные, слабдеформируемые породы. Гидротермальная переработка вызывает их разуплотнение и выщелачивание, при этом существенно меняются их деформационные и уменьшаются прочностные свойства. Происходит снижение плотности (с 2.71 г/см<sup>3</sup> у неизмененных андезитов до 2.28 г/см<sup>3</sup> у метасоматических брекчий), увеличение пористости (с 3 до 18%), снижение прочностных (прочность на одноосное сжатие с 142.3 до 20.6 МПа) и деформационных (динамический модуль упругости с 62.7 до 17.0 ГПа) характеристик [3, 24]. Такая тенденция в изменении свойств способствует дальнейшей прогрессирующей аргиллизацией. Верхний

горизонт андезитов брекчирован и превращен в метасоматические брекчии.

С поверхности термальное поле сложено гидротермальными глинами, сформированными за счет полного перерождения андезитов при взаимодействии с газо-гидротермальными флюидами. Толща глин имеет зональное строение, выражающееся в изменении цвета, консистенции, гранулометрического и минерального составов и свойств отложений. В частности, в нижней части глинистого горизонта преобладают смектиты с опалом и пиритом, в верхней – каолинит с опалом и гидроксидами железа; консистенция глин последовательно меняется от твердой в нижней части слоя до скрытотекучей в верхней [24].

Таким образом, в результате этих гидротермальных процессов формируются специфические литотопы, характерными чертами которых являются: 1) существенно глинистый состав грунтов самой верхней части разреза; 2) повышенная температура, обуславливающая температурную аномалию; 3) кислая-слабокислая среда поровых растворов в приповерхностном горизонте и щелочная на глубине; 4) измененные (по сравнению с материнскими породами) характеристики структуры и текстуры, показатели физических, физико-химических и физико-механических свойств.

Кроме изменения состава и свойств грунтов на площади ЭГС термальных полей существенно меняется *рельеф*, происходит частичное опускание поверхности, возникают отрицательные



**Рис. 3.** Схема геоморфологического строения Нижне-Кошелевской термоаномалии (по [16]): 1 – границы основного уступа; 2 – внутренние границы водоразделов; 3 – отрицательные структуры: воронки, овраги, ограничение крупных котлов; 4 – каменные развалы; 5 – термальные бугры; 6 – границы локального термального поля (участок Верхний); 7 – парогазовые источники: *а* – газовые струи, *б* – грязевые котлы, *в* – кипящие озера; 8 – водные источники: *а* – крупные пульсирующие («гейзеры»), *б* – мелкие разгрузки термальных вод, *в* – холодные источники. Размеры знаков отражают относительные размеры явлений.

формы рельефа — обширные эрозионные котловины. Причинами этих изменений являются эрозионные процессы в местах разгрузки термальных вод, а также гидротермальная переработка пород, сопровождающаяся выщелачиванием, увеличением пористости, снижением прочности и ослаблением массива, развитием оползневых процессов и др. В рельефе термальные поля обычно представляют собой понижения, осложненные воронками, котлами, оврагами и термальными буграми разного размера. Это особенно хорошо проявлено в пределах Нижне-Кошелевского (рис. 3) и Южно-Камбального Центрального термального поля (рис. 4).

*Геофизическое поле* в пределах рассматриваемого литотопа представлено, прежде всего, температурной аномалией. Внешне термальные поля представляют собой небольшие по площади и относительно однородные парящие площадки. Температура грунтов в пределах Восточно-Паужетского термального поля колеблется от 20°C на периферии до 105°C на наиболее прогретом центральном участке (на глубине 0.5–0.8 м) [17]. Вниз по разрезу температура закономерно повышается. Кроме того, проведенные в последние годы исследования показали, что данное термальное поле отличается от других полей района аномальными значениями магнитного, гравитационного и электрического полей [17].

Наряду с рассмотренными выше геохимическими и геофизическими полями важным компонентом литотопа ЭГС являются *геодинамические поля*. Последние обуславливают развитие геодинамических процессов в пределах рассматриваемого массива. Геологические процессы и явления, возникающие в результате гидротермальной деятельности, как правило, взаимосвязаны между собой и представляют определенную последовательность происходящих событий, образуя парагенетические ряды (рис. 5).

Ослабленные вследствие гидротермальных процессов породы легче подвергаются водной эрозии, оползневым процессам [23]. Наряду с этими процессами на термальных полях происходят гидротермальные взрывы. В частности, внезапный выброс горячего пара с обломками андезитов произошел в ходе бурения на Восточно-Паужетском термальном поле. По-видимому, буровой снаряд попал в зону перегретого пара, приуроченную к контакту андезитового лавового потока и подстилающих его туфов. После гидротермального выброса на этом месте образовался большой грязевой котел [23].

Все вышеперечисленные особенности анализируемого литотопа безусловно сказываются и на формирующихся на них, как на литогенной основе, эдафотопе и биотических компонентах.

*Особенности эдафотона* ЭГС Восточно-Паужетского гидротермального поля заключаются в формировании на его территории гидротермально-измененных почв — *термоземов*. Так, в пределах Паужетской гидротермальной системы выделены три группы термоземов, происхождение которых связано с участками различной интенсивности гидротермального воздействия [4].

1. *Термоземы на пирокластических субстратах* (без морфологически видимых признаков гидротермального изменения), распространенные за пределами термальных полей. Слоистость и полигенетичность почвенных профилей, легкий гранулометрический состав и высокая общая мощность почв (более 1.8 м) являются наиболее общими признаками почвообразования вне зоны термопроявлений. Строение профиля мезоморфных почв может быть представлено обобщенной формулой:  $AO/AdA1-\{A1-Bhf/Voxp-Mr\}n$ . В гидроморфных почвах в нижних горизонтах профиля отмечается оглеение; в случае воздействия минерализованных



Рис. 4. Котловина Южно-Камбального Центрального термального поля (фото Ю.В. Фроловой, 2022 г.).



Рис. 5. Геологические последствия и явления, вызванные гидротермальной деятельностью, и их взаимосвязь (по [23], с изменениями).

вод могут присутствовать солевые выцветы над уровнем капиллярной каймы. В их минеральном составе преобладают минералы материнских пород – плагиоклазы, кварц, кристобалит и отчасти смектит-каолинитовые ассоциации. Для них характерен мощный гумусовый профиль (>1 м).

2. *Термоземы, частично преобразованные* гидротермальным процессом, формирующиеся в зоне слабого или умеренного воздействия, располагаются обычно на периферии термальных полей. В нижней части профиля происходит более глубокое преобразование минеральной массы почв, вплоть до полной переработки исходных пород. При этом формируются гидротермально-метаморфические<sup>1</sup> горизонты (V<sub>m</sub>) более тяжелого (суглинистого или глинистого) гранулометрического состава, происходит оструктурирование почвенной массы и ухудшение водно-физических свойств почв. В частично метаморфизованных горизонтах (суглинистого состава), наряду с признаками гидротермального метаморфизма, хорошо выражены и альфегумусовые процессы, что позволяет выделять самостоятельные иллювиально-метаморфические горизонты (V<sub>t</sub>). Под ними формируются однородные глинистые горизонты практически без

<sup>1</sup> Отметим, что в почвоведении несколько иное понятие термина “метаморфизм”, чем принятое у геологов: почвоведы выделяют в разрезе почв *структурно-метаморфический горизонт* (V<sub>m</sub>), имеющий более яркие и “теплые” тона окраски, ореховато-комковатую структуру, отличающийся от материнской породы ее структурными изменениями почвообразовательными процессами (“метаморфизацией”) и образующийся на любых материнских породах (от скальных силикатных до глинистых, кроме песков).

признаков почвообразования (C<sub>m</sub>). Принципиальное строение профиля мезоморфных почв характеризуется формулой: Ад/АОА1-{А1-Vf<sub>h</sub>/Voxp-МГ}п-(V<sub>m</sub>)-Ст. В почвах, контактирующих с термальными водами, отмечается оглеение: АО-{А1-Vf<sub>h</sub>(g)-МГg}п-C<sub>mg</sub>-G<sub>m</sub>. В их минеральном составе преобладают минералы материнских пород, а также появляются метагаллуазит и каолинит-смектитовая ассоциация. Для них характерно полимодальное распределение гумуса с глубиной.

3. *Термоземы на гидротермальных субстратах*, формирующиеся в зоне наиболее интенсивного гидротермального воздействия. К ним относятся как наиболее молодые почвы, сравнительно недавно начавшие развиваться на гидротермально-измененных субстратах при понижении их температуры, так и почвы, претерпевшие сложную эволюцию с практически полным стиранием признаков предшествовавшего почвообразования и аккумуляции пеплов. В профиле почв, в силу их относительной молодости и/или высокого темпа гидротермального метаморфизма, отсутствует интенсивная слоистость, связанная с пеплопадами, а также не фиксируются погребенные горизонты. Почвенные признаки (гумусонакопление, дифференциация на генетические горизонты, выраженность альфегумусовых процессов и др.) ослабевают с глубиной, сменяясь признаками ГТ-метаморфизма (сапролитизация тефры, утяжеление гранулометрического состава, повышение внутрипочвенных температур и др.). В их минеральном составе уже практически нет минералов материнских пород, вместо них преобладают смектит и отчасти смектит-каолинитовая и каолинит-смектитовая ассоциации. Для них характерно резко убывающее

распределение гумуса с глубиной и маломощный гумусовый горизонт (0.1–0.5 м).

Почвы с полноразвитым профилем характеризуются следующим набором основных генетических горизонтов: Ад-АI-Bhf-Bm-Cm; их мощность варьирует от 0.5 до 1.0 м. Повышение температур в корнеобитаемом слое (до 20–30°C) приводит к интенсификации биологических процессов и увеличению количества поступающей в почвы биомассы [4].

Установлены закономерности *распределения солей* в почвах гидротерм [4]. Так, почвы, контактирующие с минерализованными термальными водами, характеризуются наибольшим содержанием солей в нижней части профиля (2.0–7.7%). Глубина горизонтов максимального соленакопления определяется положением уровня капиллярной каймы. Состав солей в большинстве случаев соответствует химическому составу самих воздействующих вод. Почвы на пропаренных ГТ-субстратах содержат меньшее количество солей (до 2%). Глубина горизонтов соленакопления зависит от уровня конденсации ГТ-пара и контролируется температурным фактором. Почвы в зонах аэриального выпадения солей могут содержать до 1% солей в поверхностных горизонтах. Поступление солей контролируется преобладающим направлением и дальностью переноса пара, особенностями рельефа, и отмечается и за пределами термальных полей.

### Особенности биотических компонентов

Биотические компоненты рассматриваемой ЭГС локального уровня представлены характерными видами микробоценоза, фито- и зооценоза, сообщества которых составляют данный биоценоз.

**Особенности микробоценоза** рассматриваемой ЭГС сформировались под влиянием геотермальных процессов на микробные сообщества, развивающиеся в ее пределах. Давно было обнаружено, что в геотермальных источниках формируются специфические микробоценозы, для которых ведущими факторами являются температура и состав геотермальных растворов [6]. При этом часто основную массу микробиоты составляют экстремофилы.

Химические компоненты ГТ-систем являются основными источниками энергии для хемоавтотрофных микроорганизмов, которые в этих биотопах и являются первичными продуцентами органического вещества, формируя цианобактериальные маты, а также взвеси и обрастания различной мощности. В последние годы появились комплексные работы, главным образом, микробиологов по изучению жизни в экстремальных природных условиях [10].

В ЭГС Восточно-Паужетского геотермального поля также выявлены микробные сообщества экстремофилов, образующие так

называемые “микробные маты”, основу которых составляют термофильные микроорганизмы. В составе этих сообществ здесь обнаружены виды, для которых оптимальны pH около 7–8 и температура 40–70°C. Это аэробные бактерии: *Thermus aquaticus*, *Th. flavus*, *Th. thermophilus*, *Th. ruber*, *Bacillus caldolyticus*, *B. caldovelox*, *B. thermocatenuatus*, *B. acidocaldarius*, *Chloroflexus aurantiacus* [8].

Кроме них в Паужетских гидротермах обнаружены различные сине-зеленые водоросли – цианобактерии. Среди них выявлены цианобактерии порядка *Mastigocladales*, представленные в основном мастигокладусом пластинчатым (*Mastigocladales laminosus*), для которого характерно V-образным ветвление. В этом порядке одно семейство *Mastigocladaceae* содержит семь родов, почти все с одним видом. Их слоевища кожистые, губчато-мясистые, крепкие и твердые, иногда слистые и с зернышками извести внутри, сине-вато- или оливково-зеленые, нити густо переплетающиеся. Наиболее пышное развитие этих цианобактерий отмечено при температуре 45–52°C, pH 7.0–8.0 в хлоридно-натриевых, углекисло-натриевых источниках с общей минерализацией 1.36–3.78 г/л и преобладанием уголекислоты, сероводорода, аммиака в составе парогазовых струй [8].

Другие синезеленые водоросли, выявленные в Паужетских гидротермах, относятся к порядку осцилляториевых (*Oscillatoriales*). Здесь встречаются виды: *Phormidium amhiguum*, *Ph. angustissimum*, *Ph. bohneri*, *Ph. foveolarum*, *Ph. frigidum*, *Ph. gelatinosum*, *Ph. inundalum*, *Ph. laminosum*, *Ph. mole*, *Ph. mucicola*, *Ph. ramosum*, *Ph. tenue*, *Ph. thermophilum*, *Ph. valderiae*, *Ph. valderiae*. Наиболее богаты видами нейтральные источники, в щелочных (pH 8.0–9.0) гидротермах видовое разнообразие меньше. Общий диапазон температур 30–70°C. Наиболее пышное развитие отмечено при температуре 40–50°C [8].

Общей особенностью для указанных микробных сообществ Паужетских гидротерм является наличие горизонтальной и вертикальной зональности в их распространении, которая, в свою очередь, обусловлена гидротермально-метасоматической зональностью строения их литотопов и эдафотопов, описанных выше.

**Особенности фитоценоза** ЭГС локального уровня Паужетских гидротерм целиком определяются абиотическими факторами: локальными аномалиями температурного поля, химизма подземных и поверхностных вод, состава и свойств грунтов и эдафотопов. Согласно геоботаническому районированию, данный фитоценоз относится к Южнокамчатскому тундрово-стланиковому округу, входящему в Южнокамчатско-Северокурильскую тундрово-стланиковую провинцию [14].

В пределах фитоценоза рассматриваемой ЭГС локального уровня в диапазоне высот 130–300 м над уровнем моря выявлены мхи, лишайники-термофилы (как, например, кладония

вулканная — *Cladonia vulcani*), а также обнаружено 112 видов и подвидов сосудистых растений, относящихся к 91 роду и 38 семействам [18]. Характерной особенностью растительного покрова гидротермально-прогретых местообитаний Паужетских гидротерм является наличие развитого мохового покрова. Развитие мохового покрова на ГТ-прогретых почвах объясняется, вероятнее всего: 1) рассредоточенным парением, создающим слой пара у поверхности земли; 2) слабой конкуренцией со стороны сосудистых растений на этих территориях. В распределении видов мхов прослеживается четкая зональность в плане [18].

В целом исследование изменчивости морфологических показателей, проективного покрытия и плотности побегов, выполненное на примере *Artemisia opulenta*, как одного из распространенных видов в пределах термального поля показало, что интенсивный ГТ-процесс оказывает угнетающее действие на растения [18]. Согласно исследованиям Т.Ю. Самковой [18], от центра к периферии термоаномалии растет общее число видов, число видов в сообществах и число сообществ. Максимальное число сообществ и местообитаний на территории термального поля приурочено к умеренно прогретой зоне за границей рассредоточенного парения. Максимальное число видов характерно для сообществ разнотравных лугов в слабо прогретых местообитаниях на периферии термоаномалии. В то же время здесь встречаются и растения-термофилы, как например, фимбристилис охотский (*Fimbristylis ochotensis*), произрастающий исключительно у термальных источников с температурой воды выше 50°C. Из прочих растений термофилов отмечены киллинга камчатская (*Kyllinga kamtschatica*), ореорхис раскидистый (*Oreorchis patens*), черела камчатская (*Bidens kamtschatica*), антоцерос пашенный (*Anthoceros agrestis*) и др., многие из которых являются реликтами теплых климатических периодов и относятся к охраняемым видам [18, 20].

В горизонтальной структуре растительности Восточно-Паужетского термального поля Т.Ю. Самковой [18] были выявлены характерные сочетания фитоценозов, образующих комплексы поясного строения, не встречающиеся вне ГТ-полей. Линейные размеры микропоясных комплексов на исследованных термальных полях варьируются от нескольких метров до нескольких десятков метров. Чаще встречаются микропоясные комплексы, диаметр центральной зоны которых составляет 4–5 м. Встречаются концентрические, эксцентрические, мозаичные микропоясные комплексы, которые, располагаясь на близких расстояниях, создают картину полицентрической комплексности. Последовательно сменяющие друг друга сообщества микропоясных комплексов по сути являются экологическими рядами. Смена сообществ происходит вдоль градиента температуры почв, а с учетом сопутствующего комплекса факторов — вдоль

комплексного градиента тепловой интенсивности геотермального процесса.

При этом для фитоценозов Восточно-Паужетского поля был выявлен обобщенный экологический ряд растительных сообществ, сменяющих друг друга по мере удаления в стороны от термопроявлений. В *мезоморфных условиях* это ряд сообществ: полевицево-фимбристелисово-зеленомошные — росичковые — лапчатковые — полынно-лапчатковые — лапчатово-полынные — полынные — сообщества разнотравных лугов — сообщества крупнотравных лугов. В *гигромезоморфных условиях* реализуется другой эколого-фитоценотический ряд: полевицево-фимбристелисово-зеленомошные — росичковые — полевицевые — полынные — ирисово-кровохлебковые — вейниковые сообщества [18].

Установлено также [18], что растительные сообщества отражают (индицируют) в первую очередь не конкретные почвенные разности, а интенсивность современного ГТ-процесса. Из этого следует, что: а) изменение экологических условий по мере активизации или угасания ГТ-процесса влечет за собой сукцессионные изменения сообществ; б) ведущими абиотическими факторами, детерминирующими смену сообществ, являются не консервативные характеристики, обусловленные ГТ-процессом, такие как общая мощность почв, мощности отдельных генетических горизонтов, гранулометрический состав, а динамичные факторы, существующие, пока существует интенсивный ГТ-процесс, и исчезающие вместе с затуханием процесса.

Т.Ю. Самковой [18] для Паужетских гидротерм было выделено шесть зон различной тепловой интенсивности влияния ГТ-процесса на фитоценозы. Границы между зонами соответствуют почвенным изотермам и смене растительных сообществ в пределах термальных полей: 1) граница экстремальных температур почв (30–25°C на глубине 5 см в октябре) — граница зоны II, индицируется границами полевицево-фимбристелисово-зеленомошных сообществ, границами распространения редких видов: *Fimbristylis ochotensis*, *Agrostis pauzhetica*, *Campulopus umbellatus*, *C. atrovirens*, *C. pyriformis*; 2) граница рассредоточенного парения (20–15°C на глубине 5 см) — переходная зона между зоной III и IV, индицируется границей между полынно-лапчатковыми и полынными сообществами; 3) граница между умеренно прогретыми и слабо прогретыми местообитаниями (10°C на глубине 5 см) индицируется границей между полынными сообществами (зона IV) и сообществами разнотравных лугов (зона V). За пределами выделенных границ происходят скачкообразные изменения количества видов.

**Особенности зооценоза** ЭГС в пределах ГТ-полей обусловлены взаимодействием факторов, определяющих специфику компонентов

эколого-геологических систем, набор и сочетание которых отличаются от характерных для зональных условий. Как и для фитоценозов по мере приближения к термопроявлениям в зооценозах меняется набор действующих факторов и нарастает их напряжение. В соответствии с этим сообщество животных термальных полей по совокупности признаков (видовому составу и разнообразию, биомассе и др.) все более отличаются от зональных. При этом формируется микропоясное строение зооценозов термальных полей, что соответствует скачкообразному характеру изменений комплекса абиотических факторов.

В то же время, влиянию зональности в пределах Паужетских термальных полей подчиняются не все животные, а только самые консервативные в смысле мобильности – гидробионты, а также тесно связанные с почвами и подпочвенными грунтами, как средой обитания, а также дендрофильные организмы [11]. К ним относятся, прежде всего, различные беспозвоночные – кольчатые черви, моллюски, некоторые членистоногие (пауки, многоножки, клещи, насекомые). Мобильные виды животных (некоторые насекомые, а также перелетные птицы, крупные млекопитающие) не подчиняются микрозональности, они могут встречаться как в пределах биотопа ГТ-систем, так и за их границами.

Среди насекомых Камчатки обнаружены облигатные виды двукрылых (*Diptera*) экстремофилов – журчалки-эристаллины (*Eristalinus sepulchralis*), основная часть жизненного цикла которых в кальдере вулкана Узон проходит в исключительных условиях сероводородных гидротермальных

источников с химическим составом, недопустимым для большинства других организмов. К настоящему времени в гидротермальных водоемах Камчатки обнаружено свыше 100 видов насекомых – гидробионтов, обитающих при повышенных температурах и гидрохимически более агрессивной среде, чем за пределами ГТ-полей [10].

Геотермальная активность на границе лесной и субальпийской растительности обуславливает на этой территории большое биотопическое разнообразие местности и, как следствие, разнообразие птиц: видовое разнообразие составляет около 31 вида на км<sup>2</sup>, а плотность населения птиц – около 212 пар/км<sup>2</sup>. Кроме того, гидротермы определяют возможность зимовки здесь некоторых видов птиц [9]. Многие из них относятся к охраняемым видам [20].

**Общие особенности эколого-геологических систем массивов гидротермальных грунтов**

В результате выполненного анализа можно охарактеризовать общие особенности ЭГС массивов гидротермальных грунтов, представленные в табл. 1, из данных которой следует, что абиотические и биотические компоненты этих систем тесно взаимосвязаны, а их взаимное влияние приводит к формированию зональности как их компонентов, так и ЭГС в целом. При этом, поскольку в плане температурное поле гидротермы в самом общем виде в основном имеет почти концентрическую структуру, то и обусловленная им зональность ЭГС и ее компонентов также имеет квазиконцентрическую структуру.

**Таблица 1.** Особенности эколого-геологических систем массивов гидротермальных грунтов

Особенности абиотических компонентов	Особенности биокосных и биотических компонентов:			
литотопа	эдафотопа	микробоценоза	фитоценоза	зооценоза
1. Специфические зональные гидротермально-метасоматические грунты 2. Температурная аномалия 3. Особый состав и pH гидротермальных растворов 4. Измененные характеристики структуры и текстуры, показателей свойств грунтов 5. Специфический рельеф 6. Парагенез геодинамических и гидротермальных процессов, активизация ЭГП	1. Развитие термоземов на: – вулканогенно-осадочных (туфогенных) грунтах; – частично преобразованных эффузивных (андезитах-андезитобазальтах) грунтах; – гидротермально-метасоматических (глинистых) грунтах; – четвертичных склоновых отложениях. 2. Наличие горизонтальной зональности почв	1. Преобладание микробов-термофилов. 2. Наличие анаэробных (на глубине) и аэробных (в верхней части) микробных сообществ. 3. Разнообразие цианобактерий. 4. Наличие горизонтальной зональности микробных сообществ.	1. Развитие термофильных фитоценозов. 2. Наличие горизонтальной микрозональности растительных сообществ.	1. Развитие термофильных зооценозов беспозвоночных и дендрофильных животных. 2. Наличие горизонтальной зональности зооценозов.

## Структура эколого-геологических систем массивов гидротермальных грунтов

Проведенный анализ позволяет получить обобщенную структуру эколого-геологических систем массивов гидротермальных грунтов, показанную на рис. 6.

Как следует из представленной схемы биотоп рассматриваемой ЭГС образован тремя абиотическими компонентами: литотопом, гидротопом и эдафотопом. Наличие температурной аномалии в литотопе (температурного поля) обуславливает вертикальную и горизонтальную зональность, проявляющуюся в особенностях зонального изменения грунтов, рельефа, геохимического, геофизического и геодинамического полей. Это также отражается в зональности гидротопы и эдафотопы.

Биотические компоненты рассматриваемой ЭГС локального уровня представлены микро-, фито- и зооценозом, которые также обладают микрозональностью, обусловленной вышеуказанными факторами, прежде всего – микрозональностью почв.



**Рис. 6.** Структура природной ЭГС массивов гидротермальных грунтов: ГДП – геодинамические поля; ГХП – геохимические поля; ГФП – геофизические поля.

## ВЫВОДЫ

В результате выполненного анализа можно сделать следующие выводы.

1. Эколого-геологические системы массивов гидротермальных грунтов обладают специфическими особенностями как абиотических, так и биотических компонентов, резко отличных от окружающих их экосистем.

2. Для эколого-геологических систем массивов гидротермальных грунтов характерна зональность, проявляющаяся во всех их компонентах и обусловленная, прежде всего, наличием температурной аномалии.

3. Определяющим фактором формирования специфических особенностей данной ЭГС является своеобразие ее литотопа, представленного массивом гидротермальных грунтов.

4. Выявленные особенности в составе и структуре анализируемой ЭГС необходимо учитывать при инженерно-экологических исследованиях и изысканиях на аналогичных объектах.

*Исследование выполнено в рамках государственного задания МГУ имени М.В. Ломоносова*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Аверьев В.В., Белоусов В.И.* Геологический очерк района Паужетского месторождения // Паужетские горячие воды на Камчатке. М.: Наука, 1965. С. 8–24.
2. *Белоусов В.И., Сугробов В.М., Сугрובה Н.Г.* Геологическое строение и гидрологические особенности Паужетской гидротермальной системы // Гидротермальные системы и термальные поля Камчатки. Владивосток, 1976. С. 23–57.
3. *Большаков И.Е.* Закономерности изменения состава и свойств андезитов и андезибазальтов на термальных полях Паужетско-Камбального района и массива Большой Семячик (Камчатка): автореф. дис. ... канд. г.-м. н. М.: МГУ, 2023. 22 с.
4. *Гольдфарб И.Л.* Влияние гидротермального процесса на почвообразование (на примере Камчатки): автореф. дис. ...канд. геогр. н. М.: МГУ, 2005. 27 с.
5. *Ерошев-Шак В.А.* Гидротермальный субповерхностный литогенез Курило-Камчатского региона. М.: Наука, 1992. 132 с.
6. *Заварзин Г.А., Карпов Г.А., Горленко В.М. и др.* Кальдерные микроорганизмы. М.: Наука, 1989. 120 с.
7. *Кононов В.И.* Геохимия термальных вод в областях активного вулканизма. М.: Наука, 1983. 215 с.
8. Красная книга Камчатки. Т. 2. Растения, грибы, термофильные микроорганизмы / Отв. ред. О.А. Черныгина. Петропавловск-Камчатский: Камч. печ. двор. Книжное издательство, 2007. 341 с.
9. *Лобков Е.Г.* Ревизия фауны птиц Долины гейзеров на Камчатке: видовой состав, особенности экологии // Вестник КамчатГУ. Биологические науки. 2023. № 65. С. 87–110.
10. *Лобкова Л.Е.* Жизнь на пределе существования: насекомые в экстремальных природных условиях кальдеры Узона и Долины гейзеров (Камчатка. Кроноцкий заповедник) // Состояние особо охраняемых природных территорий Дальнего Востока. Матер. научно-практич. конф., посв. 75-летию Лазовского

- заповедника. Владивосток: Изд-во “Русский Остров”, 2010. С. 159–166.
11. *Лобкова Л.Е.* Основные векторы адаптации насекомых к условиям обитания на геотермальных полях Камчатки // Сохранение биоразнообразия Камчатки и прилегающих морей: доклады 4-й научн. конф. Петропавловск-Камчатский: 2004. С. 96–99.
  12. *Маврицкий Б.Ф.* Термальные воды складчатых и платформенных областей СССР. М.: Наука, 1971. 242 с.
  13. *Набоко С.И.* Гидротермальный метаморфизм пород в вулканических областях. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 172 с.
  14. *Нештаева В.Ю.* Растительность полуострова Камчатка. М.: КМК, 2009. 537 с.
  15. *Пампура В.Д.* Минералообразование в гидротермальных системах. М.: Наука, 1977. 204 с.
  16. *Рычагов С.Н., Давлетбаев Р.Г., Ковина О.В., Королева Г.П.* Характеристика приповерхностного горизонта гидротермальных глин Нижне-Кошелевского и Паужетского геотермальных месторождений // Вестник КРАУНЦ. Науки о земле. 2008. № 2. Вып. № 12. С. 116–134.
  17. *Рычагов С.Н., Сандимирова Е.И., Чернов М.С. и др.* Минералообразование на Восточно-Паужетском термальном поле (Южная Камчатка) как отражение влияния глубинного щелочного флюида и эпитептермальной рудообразующей системы // Геология и геофизика. 2023. Т. 64. № 2. С. 255–279.
  18. *Самкова Т.Ю.* Влияние гидротермального процесса на растительность (на примере Паужетской гидротермальной системы Камчатки): автореф. дис.... канд. б. н. Петропавловск-Камчатский, 2009. 27 с.
  19. *Сергеева А.В., Житова Е.С., Нуждаев А.А., Назарова М.А.* Моделирование процесса минералообразования на термоаномалиях с аммонийно-сульфатными термальными водами: роль водородного показателя (рН) // Вулканология и сейсмология. 2022. №1. С. 39–53.
  20. Справочник-определитель редких и охраняемых видов животных и растений Камчатского края / Отв. ред. О.А.Черныгина. Петропавловск-Камчатский: Камчатпресс, 2013. 124 с.
  21. Структура гидротермальной системы / Отв. ред. В.И. Белоусов, И.С. Ломоносов. М.: Наука, 1993. 295 с.
  22. *Трофимов В.Т.* Эколого-геологическая система, ее типы и положение в структуре экосистемы // Вестник Моск. ун-та. Сер. 4: Геология. 2009. № 2. С. 48–52.
  23. *Фролова Ю.В.* Формирование инженерно-геологических особенностей гидротермально-метасоматических пород (на примере Курило-Камчатской вулканической дуги): автореф. дис. .... докт. г.-м. н. М.: МГУ, 2022. 34 с.
  24. *Фролова Ю.В., Чернов М.С., Рычагов С.Н. и др.* Преобразование андезитов в разрезе Восточно-Паужетского термального поля (Южная Камчатка) // Матер. XX региональной конф. “Вулканизм и связанные с ним процессы”. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2017. С. 223–226.

## CONTINENTAL ECOLOGICAL-GEOLOGICAL SYSTEMS OF HYDROTHERMAL SOILS MASSIFS OF SOUTH KAMCHATKA

V. A. Korolev<sup>a, #</sup>, Yu. V. Frolova<sup>a, ##</sup>

<sup>a</sup>*Geological Faculty, Lomonosov Moscow State University, Leninskie gory 1, Moscow, 119991 Russia*

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

<sup>##</sup>*E-mail: ju\_frolova@mail.ru*

The authors identified the main features of continental (land) ecological-geological systems (EGS) of hydrothermal soil massifs at the local level using the example of thermal fields in the south of the Kamchatka Peninsula — the East Pauzhetsky geothermal field. The field is located on the northwestern slope of the Kambalny volcanic ridge at an altitude of about 300 m above sea level. It has a shape elongated in the sublatitudinal direction with linear dimensions of the order of 350×100 m. From the surface, the thermal field is composed of hydrothermal clays formed due to the complete degeneration of andesites during interaction with gas–hydrothermal fluids. The abiotic and biotic components of the EGS data were analyzed. The specific features of the lithotopes of the considered EGS, represented by massifs of hydrothermal-metasomatic soils with a certain topography, a characteristic hydrotope, as well as geochemical, geodynamic and geophysical fields developed within their boundaries, have been established. The characteristic features of the lithotope of the EGS under consideration are: 1) the essentially clayey composition of the soils in the uppermost part of the section; 2) elevated temperature causing a temperature anomaly; 3) acidic–slightly acidic environment of pore solutions in the near-surface horizon and alkaline at depth; 4) changed (compared to parent rocks) characteristics of structure and texture, indicators of physical, physico-chemical and physico-mechanical properties. Lithotopes, in turn, determine specific edaphotopes on their surface, as well as the development of peculiar biocenoses: thermophilic microbiocenoses, communities of characteristic plants and animal thermophiles. The EGS of hydrothermal soil massifs is characterized by horizontal zoning, which manifests itself in all of its components and is caused, first of all, by the presence of a zonal temperature anomaly in the hydrotherms under consideration. The main determining factor in the formation of the specific features of this EGS is the originality of its lithotope, represented by an array of hydrothermal-metasomatic soils with vertical and horizontal zoning. The identified features in the composition and structure of the analyzed EGS must be taken into account during engineering and environmental studies and engineering and environmental surveys at similar objects.

**Keywords:** *ecological-geological system, thermal field, lithotope, edaphotope, microbiocenosis, phytocenosis, zoocenosis, hydrothermal soils, metasomatism, thermophiles*

## REFERENCES

1. Aver'yev, V.V., Belousov, V.I. [Geological sketch of the area of the Pauzhetskoye field]. In [Pauzhetskie hot waters in Kamchatka]. Moscow, Nauka Publ., 1965, pp. 8–24. (In Russian)
2. Belousov, V.I., Sugrobov, V.M., Sugrobova, N.G. [Geological structure and hydrological features of the Pauzhet hydrothermal system]. In [Hydrothermal systems and thermal fields of Kamchatka]. Vladivostok, 1976, pp. 23–57. (In Russian)
3. Bol'shakov, I.Ye. [Patterns of changes in the composition and properties of andesites and andesibasalts in the thermal fields of the Pauzhetsko-Kambalny district and the Bolshoy Semyachik massif (Kamchatka)]. Extended abstract of Cand. (Geol.-Min.) Sci. Dissertation, Moscow, Moscow State University, 2023, 22 p. (In Russian)
4. Gol'dfarb, I.L. [The influence of the hydrothermal process on soil formation (on the example of Kamchatka)]. Extended abstract of Cand. (Geol.) Sci. Dissertation, Moscow, Moscow State University, 2005, 27 p. (In Russian)
5. Yeroshchev-Shak V.A. [Hydrothermal subsurface lithogenesis of the Kuril-Kamchatka region]. Moscow, Nauka Publ., 1992, 132 p. (In Russian)
6. Zavarzin, G.A., Karpov, G.A., Gorlenko, V.M. et al. [Kal'dernyye mikroorganizmy]. Moscow, Nauka Publ., 1989, 120 p. (In Russian)
7. Kononov, V.I. [Geochemistry of thermal waters in the areas of active volcanism]. Moscow, Nauka Publ., 1983, 215 p. (In Russian)
8. [The Red Book of Kamchatka. Vol. 2. Plants, fungi, thermophilic microorganisms]. O.A. Chernyagin., (Ed), Petropavlovsk-Kamchatsky, Kamch. pech. dvor. Book Publ. House, 2007, 341 p. (In Russian)
9. Lobkov, E.G. [Revision of the bird fauna of the Geyser Valley in Kamchatka: species composition, ecological features]. *Bulletin of Kamchatka State University, Biological sciences*, 2023, no. 65, pp. 87–110. (In Russian)
10. Lobkova, L.E. [Life at the limit of existence: insects in extreme natural conditions of the Uzon caldera and the Valley of geysers (Kamchatka. Kronotsky Nature Reserve)]. In [The state of specially protected natural territories of the Far East: proc. scientific and practical conference dedicated to the 75th anniversary of the Lazovsky Reserve]. Vladivostok, "Russian Island" Publ., 2010, pp. 159–166.
11. Lobkova, L.E. [The main vectors of insect adaptation to habitat conditions in the geothermal fields of Kamchatka]. In [Conservation of the biodiversity of Kamchatka and adjacent seas: reports of the 4th scientific conf.]. Petropavlovsk-Kamchatsky, 2004, pp. 96–99.
12. Mavritskiy, B.F. [Thermal waters of folded and platform regions of the USSR]. Moscow, Nauka Publ., 1971, 242 p. (In Russian)
13. Naboko, S.I. [Hydrothermal metamorphism of rocks in volcanic areas]. Moscow, Publ. House of the USSR Academy of Sciences, 1963, 172 p. (In Russian)
14. Neshataeva, V.Yu. [Vegetation of the Kamchatka Peninsula]. Moscow, KMK Publ, 2009, 537 p. (In Russian)
15. Pampura, V.D. [Mineral formation in hydrothermal systems]. Moscow, Nauka Publ., 1977, 204 p. (In Russian)
16. Rychagov, S.N., Davletbaev, R.G., Kovina, O.V., Koroleva, G.P. [Characteristics of the near-surface horizon of hydrothermal clays of Nizhne-Koshelevsky and Pauzhetsky geothermal deposits]. *Vestnik KRAUNTS. Earth sciences*, 2008, no. 2, issue 12. pp. 116–134. (In Russian)
17. Rychagov, S.N., Sandimirova, E.I., Chernov, M.S. et al. [Mineral formation in the East-Pauzhetsky thermal field (South Kamchatka) as a reflection of the influence of deep alkaline fluid and epithermal ore-forming system]. *Geology and Geophysics*, 2023, vol. 64, no. 2, pp. 255–279. (In Russian)
18. Samkova, T.Y. [The influence of the hydrothermal process on vegetation (on the example of the Pauzhet hydrothermal system of Kamchatka)]. Extended abstract of Cand. (Biolog.) Sci. Dissertation, Petropavlovsk-Kamchatsky, 2009, 27 p. (In Russian)
19. Sergeeva, A.V., Zhitova, E.S., Nuzhdaev, A.A., Nazarova, M.A. [Modeling of the process of mineral formation on thermoanomalial with ammonium-sulfate thermal waters: the role of the hydrogen index (pH)]. *Volcanology and seismology*, 2022, no. 1, pp. 39–53.
20. [Handbook of rare and protected species of animals and plants of the Kamchatka Territory]. O.A. Chernyagin, (ed), Petropavlovsk-Kamchatsky, Kamchatpress Publ., 2013, 124 p. (In Russian)
21. [The structure of the hydrothermal system]. V.I. Belousov, I.S. Lomonosov, (Eds), Moscow, Nauka Publ., 1993, 295 p.
22. Trofimov, V.T. [Ecological and geological system, its types and position in the ecosystem structure]. *Bulletin of Moscow Univ, Ser. 4: Geology*, 2009, no. 2, pp. 48–52. (In Russian)
23. Frolova, Yu.V. [Formation of engineering-geological features of hydrothermal-metasomatic rocks (on the example of the Kuril-Kamchatka volcanic arc)]. Extended abstract of Cand. (Geol.-Min.) Sci. Dissertation, Moscow State University, 2022. 34 p. (In Russian)
24. Frolova, Yu.V., Chernov, M.S., Rychagov, S.N. et al. [Transformation of andesites in the section of the East-Pauzhet thermal field (South Kamchatka)]. In [Proc. XX Regional conf. "Volcanism and related processes"]. Petropavlovsk-Kamchatsky, IViS FEB RAS, 2017, pp. 223–226. (In Russian)

УДК 624.131+551.435.8:519.2

## ВЕРОЯТНОСТНО-СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА КАРСТОВО-СУФФОЗИОННОЙ ОПАСНОСТИ И РИСК РАЗРУШЕНИЯ ПРОВАЛАМИ ГЛАВНЫХ ОБЪЕКТОВ НИЖЕГОРОДСКОЙ АТОМНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ (НИАЭС)

© 2024 г. А. В. Аникеев<sup>1</sup>, \*<sup>1</sup>Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, Уланский пер. 13, стр. 2, Москва, Россия

\*E-mail: anikееv\_alex@mail.ru

Поступила в редакцию 02.09.2024 г.

После доработки 22.09.2024 г.

Принята к публикации 10.10.2024 г.

Главным показателем силы воздействия карстово-суффозионных провалов на окружающую среду служит диаметр воронок, а основным вероятностным показателем — интенсивность их образования. Риск потерь от провалов в общем виде представляет собой произведение вероятности поражения объекта-реципиента на ущерб от его повреждения или разрушения. Предложены формулы расчета ущерба и уязвимости, позволяющие с единых позиций оценивать физические и экономические инженерные и территориальные потери. Рассмотрены используемые в настоящее время экспоненциальная и линейная стохастические модели провалообразования, и показано, что при интенсивности процесса и площади объектов-реципиентов риска меньших  $0.1 \text{ год}^{-1} \cdot \text{км}^{-2}$  и 10 га соответственно, они дают близкие значения вероятности поражения последних. Линейная модель в виде системы двух уравнений лишена некоторых исходных ее недостатков и позволяет прогнозировать риск потерь и в случае невыполнения закона Пуассона. Оценка риска в статье базируется на полученных при изысканиях данных о провалах на территории Нижегородской атомной электростанции (НИАЭС). Установлено, что пуассоновский поток событий здесь не имеет места, и для прогноза выбрана линейная модель риска, записанная в виде произведения частоты поражения четырех основных сооружений НИАЭС на их уязвимость. С учетом некоторых допущений и конструктивных особенностей этих сооружений показано, что риск их запроектных аварий и риск выбросов радиации на промплощадке во много раз меньше допустимых значений, регламентируемых нормативными документами по использованию атомной энергии.

**Ключевые слова:** карст, карстово-суффозионные воронки, опасность, риск, стохастические модели, ущерб, уязвимость

DOI: 10.31857/S0869780924060028 EDN: AMFFCK

### ВВЕДЕНИЕ

Участок строительства Нижегородской атомной электростанции (НИАЭС) площадью  $20 \text{ км}^2$  выбран в Навашином районе Нижегородской обл. на границе с Владимирской обл., исходя из требований НП-032-01<sup>1</sup>, и в основном по причинам экономическим, социальным и энергетическим [4]. Учет инженерно-геологических условий при этом отошел на второй план, и НИАЭС оказалась, по-видимому, первой в мире атомной станцией, спроектированной на территории интенсивного провалообразования в условиях покрытого сульфатно-карбонатного карста.

В результате долгих и скрупулезных комплексных изысканий, выполненных проектным институтом ОАО «НИАЭП» и рядом привлеченных научно-исследовательских и производственных организаций, с трудом выделен участок площадью  $S_0 = 3.25 \text{ км}^2$ , где проявления карста на земной поверхности отсутствуют. Эта площадка, предназначенная для строительства главных сооружений, расположена на правом берегу р. Ока в 3-х км южнее нее и в 1 км западнее палеовреза р. Бол. Кутра на абс. отм. 110–130 м. Ближайшие населенные пункты: с. Монаково, с. Ефаново, д. Родиониха, д. Мартюшиха, с. Чудь (рис. 1).

Детальный анализ инженерно-геологических условий, их схематизация и детерминированная оценка опасности провалообразования на этой площадке выполнены в [2, с. 277–286]. Там же показано, что в природных условиях массив пород

<sup>1</sup> НП-032-01. Размещения атомных станций. Основные критерии и требования по обеспечению безопасности / Госатомнадзор РФ. М., 2002. 11 с. <https://docs.cntd.ru/document/1200034263>.



Рис. 1. Местоположение площадки размещения основных сооружений НИАЭС.

в ее границах обладает 3–4-х кратным запасом устойчивости.

В настоящей работе, учитывая, что весь участок строительства относится к району реализованной карстово-суффозионной опасности, уместно оценить эту опасность и риск поражения главных сооружений НИАЭС воронками с вероятностно-статистических позиций.

### ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ВЕРОЯТНОСТНО-СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА КАРСТОВО-СУФФОЗИОННОЙ ОПАСНОСТИ И РИСКА

Под карстово-суффозионной опасностью автор понимает процесс образования одноименных воронок, т.е. локальное деформирование и разрушение покровной толщи закарстованных массивов в результате выноса несвязных и раздробленных связных грунтов в трещинно-карстовые коллекторы [1, 2]. Другими словами, это процесс провалообразования в районах покрытого карста. Называть провалы земли в таких районах РФ карстовыми, на наш взгляд, не вполне правильно.

В инженерном карстведении при математическом описании распределения провалов во времени они рассматриваются как случайные дискретные события [5, 8, 14, 15]. И главным показателем силы их воздействия на здания и сооружения служит диаметр воронок — средний ( $D_{cp}$ ) или максимальный ( $D_{max}$ ), а основным вероятностным

показателем — интенсивность их образования  $\lambda$  [8, 11, 12, 16, 17]:

$$\lambda = \lambda^*/S = N/TS, \quad (1)$$

где  $N$ ,  $T$ ,  $S$  — количество, время образования и площадь распространения воронок соответственно;  $\lambda^*$  — частота их появления:

$$\lambda^* = N/T. \quad (2)$$

Наиболее общая и общепринятая формула риска потерь от природных опасностей записывается в виде [8, 9, 12, 19, 20]:

$$R_o = P_o \cdot D_o, \quad (3)$$

где  $P_o$  — вероятность (probability) поражения объекта,  $D_o$  — ущерб (damage) от его повреждения или разрушения за заданное время  $\Delta t$ . Интервалом  $\Delta t$ , как правило, служит либо единственный отрезок времени  $\Delta t = 1$  год, либо срок эксплуатации объекта  $\Delta t = T_o$ , в первом случае получаем ежегодный ущерб, во втором — полный.

Ущерб  $D_o$ , обозначенный в (3) жирным шрифтом, чтобы отличать его от диаметра  $D$  воронок, может быть прямым и косвенным. Если ограничиться вычислением прямого ущерба и в качестве реципиентов риска рассматривать только новые здания и сооружения, чтобы не учитывать износ конструкций, а также земельные угодья, т.е. некоторую территорию, то он равен:

$$D_o = C_o \cdot V_o = (C_o)_d, \quad (4)$$

где  $C_o$  — стоимость (cost) объекта,  $(C_o)_d \leq C_o$  — стоимость его поврежденных или вышедших из строя частей;  $V_o$  — экономическая уязвимость (vulnerability) объекта:

$$V_o = (C_o)_d / C_o. \quad (5)$$

Выражения (4), (5) позволяют с единых позиций оценивать физический и экономический ущерб от поражения инженерных объектов и территорий геологическими процессами. Отметим также, что если неизвестную нам стоимость объекта принять равной  $C_o = 100\%$ , или  $C_o = 1$ , то, как следует из формулы (4), ущерб  $D_o$  тождественен уязвимости  $V_o$ . При этом не суть важно какая это уязвимость — экономическая или физическая, поскольку в данном случае ущерб прямой, сооружения новые и значения обоих типов уязвимости равны.

Уязвимость как свойство объекта утрачивать заданные функции при воздействии на него карстово-суффозионных воронок помимо площади последних  $S_b = \pi D^2/4$ , а значит и их диаметра  $D$ , зависит от типа сооружения и площади его фундамента  $S_{\phi}$ . Данные таблицы, составленной для типовых зданий [8, с. 115; 11, с. 42], показывают, что экономическая уязвимость уменьшается с уменьшением  $D$  и увеличением  $S_{\phi}$ . Минимальными значениями  $V_o$  характеризуются монолитные здания, максимальными — каркасные.

Таким образом, выделяются две группы показателей риска провалообразования. Показатели

первой ( $N, S_b, D, S, T, \lambda^*, \lambda$ ) характеризуют источник опасности – процесс, и относятся к массиву пород и территории, в границах которых он проявляется. Характеристики второй группы ( $S_\phi, S_o, T_o, V_o, C_o$ ) принадлежат реципиенту опасности. И те, и другие влияют на величину ущерба  $D_o$ , который служит одним из двух главных комплексных показателей риска.

Другой главный комплексный показатель  $P_o$  представляет для инженера-геолога наибольший интерес и заслуживает отдельного обсуждения.

### МОДЕЛИ ОЦЕНКИ КАРСТОВО-СУФФОЗИОННОЙ ОПАСНОСТИ И РИСКА

Придерживаясь общепринятой формулы (3) и считая, что второй сомножитель (ущерб  $D_o$ ) нами определен, видим, что оценка риска сводится к нахождению первого сомножителя – вероятности  $P_o$ , обычно отождествляемой с опасностью. Согласно представлениям А.Л. Рагозина [9], которые нашли отражение в Рекомендациях [11] и в оценке карстового риска на территории Республики Татарстан [10], вероятность поражения объекта за срок его службы  $T_o \leq 50$  лет является линейной функцией частоты или интенсивности провалов:

$$P_o = \lambda^* P_s T_o = \lambda^* \cdot (S_o/S) T_o = \lambda_o^* T_o = \lambda S_o T_o, \quad (6)$$

где  $P_s = S_o/S$  – геометрическая вероятность образования воронки на площади объекта  $S_o$ . Последнее соотношение, конечно, можно назвать геометрической вероятностью, но суть в том, что  $\lambda^* \cdot (S_o/S) = \lambda_o^*$  есть не что иное, как ежегодная вероятность поражения именно площади  $S_o$ , а не всей территории  $S$ , в пределах которой она расположена ( $S_o \leq S$ ). При этом, как следует из (1):

$$\lambda_o^* = \lambda S_o. \quad (7)$$

Более строгая с теоретических позиций стохастическая модель базируется на представлении о провалах как редких случайных событиях, распределение которых во времени подчиняется закону Пуассона, лежащему, к слову сказать, в основе анализа и других экзогенных геологических опасностей [3]. Она предложена В.В. Толмачевым [15] для оценки карстового риска на территории Нижегородской области и в настоящее время используется не только там [6, 12, 16, 17]. Согласно этой модели, вероятность  $P_o$  связана с показателями  $\lambda^*, S, \lambda, \lambda_o^*, S_o, T_o$  экспоненциальным уравнением:

$$P_o = 1 - \exp(-\lambda^* \cdot S_o \cdot T_o / S) = 1 - \exp(-\lambda_o^* \cdot T_o) = 1 - \exp(-\lambda \cdot S_o \cdot T_o). \quad (8)$$

Считается [7], что закон Пуассона и, следовательно, уравнение (8) справедливы, если опасный процесс стационарный ( $\lambda^* = \text{const}$ ), его проявления ординарны (за малый промежуток времени происходит не более одного события), и отсутствует

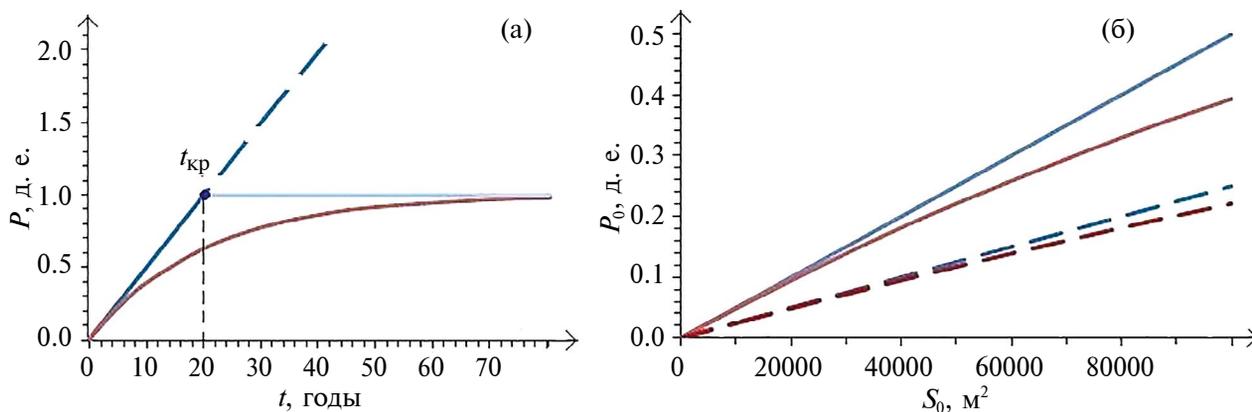
последствие (частота процесса не изменяется после той или иной его реализации). Это довольно сильные ограничения, особенно если речь идет о техноприродных процессах, когда воронки могут появляться попарно и их трудно считать независимыми событиями, да и характер процесса во времени сильно меняется, а порой становится циклическим [2, с. 255–276]. Все они в той или иной степени относятся и к линейной модели (6), зато она не требует специального обоснования. При использовании же экспоненциальной модели (8) нужно показывать, что для данной выборки среднегодовое количество провалов на площади  $S$ , численно равное их частоте  $\lambda^*$ , равно эмпирической дисперсии  $\sigma^2$  случайной величины  $X = \lambda^* \cdot \Delta t$ , которая представляет собой ежегодное количество воронок и может принимать значения  $x = 0, 1, 2, \dots, n$  (как правило,  $n \leq 3-5$ ). Дело в том, что закон Пуассона однопараметрический [7, 12], и в нашем случае среднегодовое количество воронок  $\lambda^* \cdot \Delta t$ , где  $\Delta t = 1$  год, как раз и является параметром распределения Пуассона, который по определению равен и математическому ожиданию  $M[X]$ , и дисперсии  $D[X]$ . Если  $\lambda^* \cdot \Delta t \approx M[X] \neq \sigma^2 \approx D[X]$ , то вероятность  $P_o$  можно найти с помощью уравнения (6), но с некоторыми оговорками.

На рис. 2а показаны результаты вычисления вероятности образования хотя бы одной воронки на территории  $S$  согласно (6), (8), в которых  $P_s = S_o/S = 1, T_o = t$ . Видно, что при  $\lambda^* t < 0.25$  ( $t < 5$  лет для принятой на рисунке частоты  $\lambda^* = 0.05 \text{ год}^{-1}$ ) значения  $P$  практически совпадают: их разность  $\Delta P = (P_6 - P_8) < 3\%$ . Однако в отличие от экспоненциальной зависимости линейная функция (6), по сути дела, показывает рост числа провалов во времени:  $P = \lambda^* t = n$ . И при достаточно большом значении  $t$  может оказаться, что  $P > 1$  даже при очень малой частоте процесса. На рис. 2а таким критически большим значением времени служит  $t_{кр} = 20$  лет.

Но вероятность не может быть больше единицы, а в качестве прогнозного интервала времени, на которое мы распространяем данные наблюдений, полученные за время  $t$ , выступает срок службы объекта  $T_o$ . Поэтому следует ввести дополнительное условие [1]:  $P = 1$  при  $t_{кр} = T_o > 1/\lambda^* = \Delta t^*$ , где  $\Delta t^*$  – повторяемость процесса, и записать линейную функцию в виде системы двух уравнений (9):

$$\begin{cases} P = \lambda^* t, t_{кр} = T_o \leq 1/\lambda^*; \\ P = 1, t_{кр} = T_o > 1/\lambda^*. \end{cases} \quad (9)$$

Принимая это условие, видим на рис. 2а, что значения вероятности появления воронки на площади  $S$ , посчитанные по уравнениям (9), в которых  $T_o = 20$  лет, и (8), в котором  $S_o/S = 1$  и  $T_o = t$ , практически совпадают ( $\Delta P < 3\%$ ) не только при малом, но и большом числе провалов  $n = \lambda^* t > 3.5$  ( $t > 70$  лет на рис. 2а). В области средних значений  $\lambda^* t = 0.75-1.5$  ( $t = 15-30$  лет) разность



**Рис. 2.** Линейные (синие) и экспоненциальные (красные) графики зависимости вероятности  $P$  поражения территории от времени  $t$  при частоте провалообразования  $\lambda^* = 0.05 \text{ год}^{-1}$  (а), и вероятности поражения объекта  $P_0$  от его площади  $S_0$  за время  $T_0 = 50$  лет для двух значений интенсивности процесса  $\lambda$ : сплошные линии –  $\lambda = 0.1 \text{ год}^{-1} \cdot \text{км}^{-2}$ , пунктирные –  $\lambda = 0.05 \text{ год}^{-1} \cdot \text{км}^{-2}$  (б) [1].

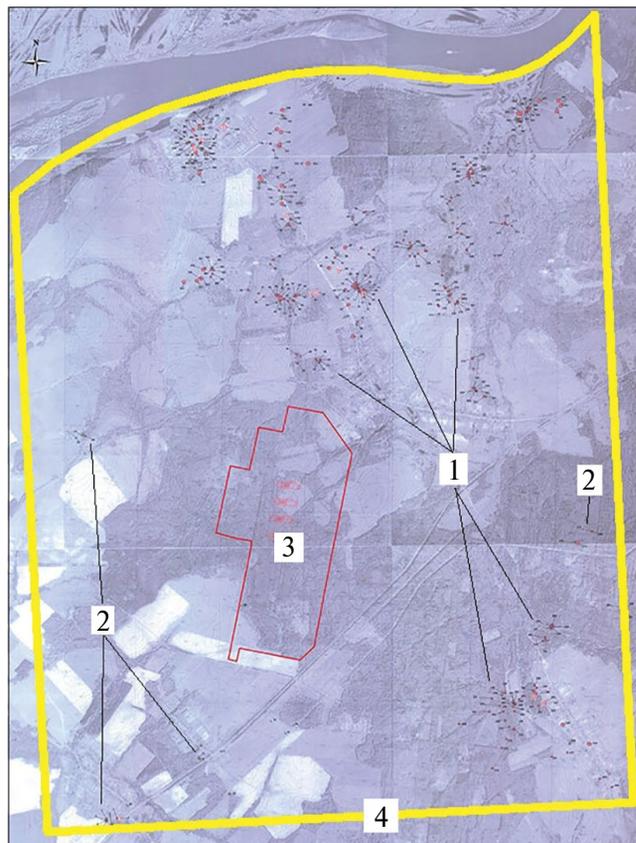
$\Delta P$  увеличивается до 22–30% и даже 37% при  $\lambda^*t = 1$  ( $t_{\text{кр}} = 20$  лет). Однако при той точности, с какой мы устанавливаем некоторые показатели опасности, например, время образования или возраст воронок и площадь их развития, эти цифры не кажутся очень большими. И, кроме того, завышение опасности на 20–30% не противоречит консервативному подходу к оценке устойчивости территорий, принятому в инженерных изысканиях и проектировании самых разных объектов.

На рис. 2б приведены графики зависимости вероятности  $P_0$  поражения объекта от его площади  $S_0$ . Они рассчитаны по формулам (6) и (8) для двух достаточно высоких значений интенсивности  $\lambda$ . Первое,  $\lambda_1 = 0.1 \text{ год}^{-1} \cdot \text{км}^{-2}$ , характеризует границу между II и III категориями устойчивости, второе –  $\lambda_2 = 0.05 \text{ год}^{-1} \cdot \text{км}^{-2}$  – между III и IV категориями [12, 14, 16–18]. Видно, что чем больше  $\lambda$ , тем большие значения вероятности дает линейная функция по сравнению с экспоненциальной. Так, пунктирные линии почти совпадают ( $\Delta P_0 < 3\%$ ) на всем отрезке  $S_0$ , показанном на рис. 2б ( $S_0 < 10$  га), а сплошные – только на его первой половине ( $S_0 < 5$  га). Увеличивается разность значений  $P_0$  и при увеличении площади объекта. Однако для обычных зданий и сооружений площадью  $S_0 < 10$  га даже при столь высокой интенсивности, как  $\lambda_1$ , она невелика ( $\Delta P_0 < 11\%$ ), и в практических оценках риска ею можно пренебречь.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ПОЛЕВЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ АНАЛИЗ

Карстологическая съемка территории площадью  $S = 50 \text{ км}^2$  проведена коллективом ФГУП ИМГРЭ под руководством Н.А. Миронова в ходе изысканий в 2010 г. Почти в центре этой территории и находится промплощадка “Монаково” ( $S_0 = 3.25 \text{ км}^2$ ), выбранная для строительства основных сооружений (рис. 3).

На площади  $S = 50 \text{ км}^2$  зарегистрированы 335 поверхностных форм карста ( $N_{\Sigma} = 335$ ). Они подразделены на: 1) провалы, 2) воронки диаметром  $D \leq 20$  м, 3) воронки диаметром  $D > 20$  м, 4) западины неясного генезиса. Первая группа выделялась



**Рис. 3.** Поверхностные проявления карста на участке НИАЭС и прилегающей территории: 1 – скопления воронок; 2 – одиночные воронки; 3 – площадка размещения основных сооружений; 4 – граница специальной съемки поверхностных карстовых форм в масштабе 1 : 10 000 на территории площадью  $S = 50 \text{ км}^2$  (по материалам ОАО “НИАЭП”).

не по морфометрическим признакам. К провалам, согласно [14], отнесены разные по форме и размерам воронки, время появления которых на земной поверхности достоверно установлено.

Плотность всех локальных поверхностных форм карста высока:  $N_{\Sigma}/S = 335/50 = 6.7 \text{ км}^{-2}$ . Подавляющее их большинство находится в 0.55–2.80 км севернее и северо-восточнее границ промплощадки  $S_0$ , 49 форм – на ЮВ территории  $S$  и единичные воронки – на В, З и ЮЗ (см. рис. 3). Эта же закономерность наблюдается и в распределении 14 провалов, которые образовались за время  $T = 53$  года, с 1957 по 2009 г. включительно. Девять из них встречены севернее площадки (4 – в с. Чудь, 5 – в долине р. Куляковка), ближайший – в 1.50 км от ее границ. На расстоянии 2.20–2.75 км на ЮЗ (южнее д. Родиониха) и на ЮВ (в д. Мартюшиха) зафиксировано 1 и 4 провала соответственно.

Фактические данные об этих провалах сведены в табл. 1. Видно, что эмпирическая дисперсия  $\sigma^2$  случайной величины  $X$  – ежегодного количества провалов  $\lambda^*_i$  за время  $T_i$  – почти в 2 раза больше ее среднестатистического значения – частоты провалов  $\lambda^* = N/T$ . Из этого следует, что пуассоновский поток событий здесь не имеет места, поскольку, как отмечалось, закон Пуассона однопараметрический.

Так как  $\lambda^* = 0.2642 \text{ год}^{-1}$  (см. табл. 1), то критическое значение времени, при котором справедливо первое уравнение системы (9) составляет  $t_{кр} = 1/\lambda^* = 3.785 \approx 4.0$  года. Очевидно, что оно много меньше рекомендуемого в [11] срока службы инженерно-технических объектов ( $T_0 = 50$  лет), и, следовательно,  $P = 1$ . Другими словами, в течение прогнозного интервала времени, принимаемого равным  $T_0 = 50$  лет, образование хотя бы одной воронки на площади  $S = 50 \text{ км}^2$  – событие достоверное.

Так как, согласно (1), интенсивность провалов – это их частота, нормированная по площади, то, ориентируясь на значения  $\lambda^* = 0.2642 \text{ год}^{-1}$  и  $S = 50 \text{ км}^2$ , видим, что интенсивность процесса на рассматриваемой территории равна  $\lambda = 0.00528 \text{ год}^{-1}\text{км}^{-2}$ . Такое ее значение на порядок больше тех, которые всеми правдами и неправдами, в том числе и с использованием метода удаленности от ближайшего проявления карста

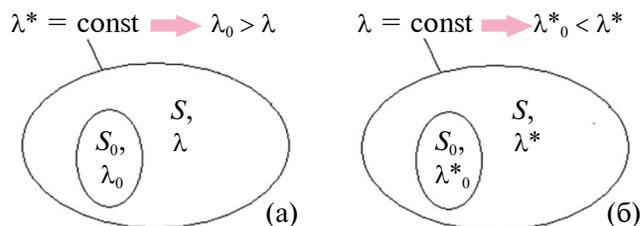


Рис. 4. Соотношение интенсивности  $\lambda$  и частоты  $\lambda^*$  провалов на оцениваемом участке (объекте)  $S_0$  и всей территории  $S$ , ограниченной изолиниями  $\lambda^* = \text{const}$  (а) и  $\lambda = \text{const}$  (б).

[13, 14], получены при изысканиях для площадок двух проектируемых энергоблоков. Тем не менее, принимаем именно это значение в качестве расчетного не только для всей территории площадью  $S = 50 \text{ км}^2$ , но и промплощадки  $S_0 = 3.25 \text{ км}^2$  – территориального объекта-реципиента риска, а также для всех расположенных на ней сооружений НИАЭС (инженерных объектов-реципиентов). То есть используем второй подход к стохастическим прогнозам [1, 2], согласно которому интенсивность  $\lambda = 0.00528 \text{ год}^{-1}\text{км}^{-2} = \text{const}$  (рис. 4б). Тогда из (7) следует, что частота провалов на площади  $(S_0)_i$  того или иного инженерного объекта-реципиента риска равна:

$$(\lambda^*_o)_i = (S_0)_i \lambda = \lambda^*(S_0)_i / S. \quad (10)$$

Первый подход, предполагающий, что  $\lambda^* = \text{const}$  (рис. 4а), лежит в основе вышеупомянутого метода удаленности [13], а также региональной оценки провального риска [10].

На промплощадке проектом предусмотрено возведение энергоблоков № 1 и № 2. Каждый из них состоит из 4-х одинаковых главных сооружений (рис. 5). Результаты вычисления  $(\lambda^*_o)_i$ , где нижний индекс “i” соответствует порядковому номеру объекта ( $i = 1, 2, 3, 4$ ), приведены в табл. 2.

Видим (см. табл. 2), что частота образования провалов под тремя первыми объектами находится в интервале значений  $(\lambda^*_o)_{1,2,3} = (2.1\text{--}3.2) \cdot 10^{-5} \text{ год}^{-1}$ . Под последним – башенной испарительной градирней, она в 3–4 раза больше:  $(\lambda^*_o)_4 = 8.6 \cdot 10^{-5} \text{ год}^{-1}$ .

Таблица 1. Эмпирический закон (строки 1–3) и параметры распределения (строки 4–6) годового числа провалов  $X = \lambda^*_i$  за время  $T_i$  ( $T = \Sigma T_i = 53$  года)

1	Значения $X(\lambda^*_i)$	0	1	2	3	
2	Частоты ( $T_i$ )	45	4	2	2	
3	Частоты ( $T_i/T$ )	0.8491	0.0755	0.0377	0.0377	
4	Среднее значение $X_{cp} = \lambda^* = \Sigma \lambda^*_i T_i / T$					0.2642
5	Дисперсия $\sigma^2 = (\Sigma T_i (\lambda^*_i - \lambda^*)^2) / T$					0.4963
6	Отношение $\sigma^2 / X_{cp}$					1.88

**Таблица 2.** Размеры основных сооружений энергоблоков № 1, № 2 и значения частоты провалообразования ( $\lambda^*_{oi}$ ) в их основании

№ п/п	Основные сооружения			$S$ , (км <sup>2</sup> )	$(S_o)_i/S$ , ( $10^{-4}$ )	Частота провалов		
	Название	Размеры, (м)				$(S_o)_i$ , (м <sup>2</sup> )	$\lambda^*$ , (год <sup>-1</sup> )	$(\lambda^*_{oi})_i$ , ( $10^{-5}$ год <sup>-1</sup> )
1	Реакторное здание	72.0	78.0	5616.0	50	1.123	0.264	2.97
2	Вспомогательное реакторное здание	60.0	66.0	3960.0		0.792		2.09
3	Здание турбины	101.2	60.0	6072.0		1.214		3.21
4	Башенная испарительная градирня диаметром $D=143.6$ м			16187.5		3.237		8.55

Теперь, определив частоту процесса в границах каждого сооружения на основании того, что  $\lambda = \text{const}$ , можем оценить инженерный риск ежегодных потерь  $(R_o)_i$ , воспользовавшись общепринятым выражением (3), в котором первый сомножитель (вероятность  $P_o$  поражения объектов провалами) целесообразно принять равным  $(P_o)_i = (\lambda^*_{oi})_i$ . И, если стоимость объектов мы принимаем равной  $(C_o)_i = 1$ , то, как показано в первой части статьи, вычисление второго сомножителя (ущерба  $D_o$ ) сводится к определению уязвимости сооружений:  $(D_o)_i = (V_o)_i$ .

Назначение в качестве расчетной не полной, как того требует (6), а ежегодной вероятности поражения инженерных сооружений провалами прямо следует из требований нормативных документов по использованию атомной энергии, которые, по существу, регламентируют величину ежегодного физического риска разрушения объектов. Согласно этим требованиям допустимое значение частоты запроектных аварий составляет  $(\lambda^*_{a, \text{доп}}) \equiv (R_a)_{\text{доп}} = 10^{-6}$  год<sup>-1</sup>, а разрушений корпуса реактора и, следовательно, выбросов радиации –  $(\lambda^*_{p, \text{доп}}) \equiv 10^{-7}$  ( $R_p$ )<sub>доп</sub> год<sup>-1</sup>. Значения и первой, и второй частоты (риска) свидетельствуют о том, что в России требования к строительству АС<sup>2,3</sup> чрезвычайно высокие: вероятность и аварийных ситуаций, и радиоактивного загрязнения территории должна быть практически нулевой.

С учетом вышеперечисленных соображений запишем окончательно формулу вычисления риска запроектных аварий  $(R_a)$  в виде:

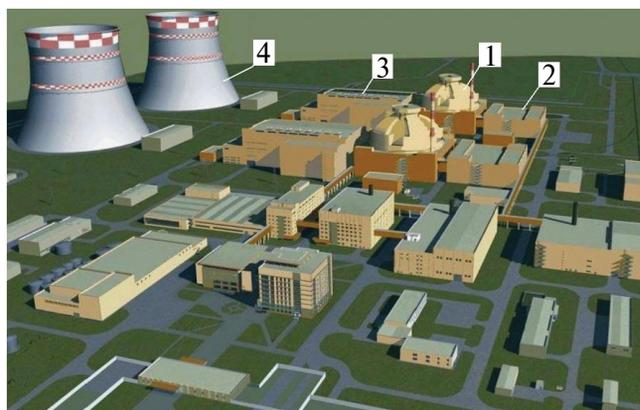
$$(R_a)_i = (\lambda^*_{oi})_i \cdot (V_o)_i, \quad (11)$$

<sup>2</sup> НП-064-05. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Учет внешних воздействий природного и техногенного происхождения на объекты использования атомной энергии. М.: Ростехнадзор, 2006. 87 с. <https://docs.cntd.ru/document/1200043834>.

<sup>3</sup> ОПБ-88/97. Общие положения обеспечения безопасности атомных станций НП-001-97 (ПНАЭ Г-01-011-97). М.: Госатомнадзор России, 1998. <https://ruzkabel.ru/assets/files/pnae-g-1-011-97>.

где  $(V_o)_i$  – физическая уязвимость  $i$ -го объекта при его поражении карстово-суффозионной воронкой. Значения  $(\lambda^*_{oi})_i$  для четырех главных инженерных объектов каждого энергоблока, посчитаны в табл. 2, а значения  $(V_o)_i$  можно в первом приближении найти, воспользовавшись приложением 6 из Рекомендаций [11, с. 42], составленным для типовых зданий. При этом мы вынуждены допустить равенство физической и экономической уязвимостей объектов, так как в этом приложении указаны значения последней. Однако для недавно построенных, а тем более проектируемых сооружений это допущение, как отмечалось, полностью корректно.

Уязвимость зданий и сооружений любого типа для провалов [11, приложение 6, с. 42] зависит от соотношения  $S_b/(S_{\phi})_i$ , в котором  $S_b$  – средняя или максимальная площадь воронок,  $(S_{\phi})_i$  – площадь фундамента основных сооружений. В материалах изысканий указано, что тип фундаментов для реакторных отделений – забивные сваи, объединенные монолитным железобетонным ростверком под монолитной железобетонной плитой; для здания турбины – забивные сваи, объединенные



**Рис. 5.** Макет энергоблоков Нижегородской АЭС: 1 – реакторное здание, 2 – вспомогательное реакторное здание, 3 – здание турбины, 4 – башенная испарительная градирня (по материалам ОАО НИАЭС).

**Таблица 3.** Расчетные значения максимального диаметра возможных провалов  $D_{\max}$  (по материалам ОАО НИАЭП) и отношение максимальной площади воронок  $(S_{\text{в}})_{\max}$  к площади фундаментов главных объектов  $(S_{\text{ф}})_i = (S_{\text{о}})_i$

№ объекта	Энергоблок № 1				Энергоблок № 2			
	$D_{\max}$	$(S_{\text{в}})_{\max}$	$(S_{\text{о}})_i$	$(S_{\text{в}})_{\max}/(S_{\text{о}})_i$	$D_{\max}$	$(S_{\text{в}})_{\max}$	$(S_{\text{о}})_i$	$(S_{\text{в}})_{\max}/(S_{\text{о}})_i$
	м	м <sup>2</sup>		д.е.	м	м <sup>2</sup>		д.е.
1	15.0	176.6	5818.0	0.031	14.7	169.6	5818.0	0.030
2	15.0	176.6	3960.0	0.045	14.7	169.6	3960.0	0.043
3	15.0	176.6	6072.0	0.029	14.7	169.6	6072.0	0.028
4	15.0	176.6	16187.5	0.011	14.7	169.6	16187.5	0.010

**Таблица 4.** Результаты вычисления риска  $(R_{\text{а}})_i$  запроектных аварий основных сооружений НИАЭС по (11)

№ п/п	Сооружения	Уязвимость $(V_{\text{о}})_i$ , (д.е.)	Частота поражения $(\lambda^*_{\text{о}})_i$ , (год <sup>-1</sup> )	Риск $(R_{\text{а}})_i$ , (10 <sup>-8</sup> год <sup>-1</sup> )
1	Реакторное здание	0.002	0.0000297	5.9
2	Вспомогательное реакторное здание	0.002	0.0000209	4.2
3	Здание турбины	0.002	0.0000321	6.4
4	Башенная испарительная градирня	0.002	0.0000855	17.0

монолитным железобетонным ростверком под ленточными монолитными фундаментами; для башенной испарительной градирни – забивные сваи по монолитному ростверку под кольцевой фундамент вытяжной башни.

Из сказанного следует, что площадь зданий и фундаментов реакторных отделений совпадают, и  $(S_{\text{ф}})_{1,2} = (S_{\text{о}})_{1,2}$ . Для зданий турбины и градирни, строго говоря,  $(S_{\text{ф}})_{3,4} < (S_{\text{о}})_{3,4}$ . Но, учитывая, что ленточный и кольцевой фундаменты этих объектов опираются на сваи, связанные монолитными железобетонными ростверками, с уверенностью полагаем, что их устойчивость много больше устойчивости типовых столбчатых или ленточных фундаментов, и принимаем  $(S_{\text{ф}})_{3,4} \approx (S_{\text{о}})_{3,4}$ . Таким образом, площадь фундаментов главных сооружений НИАЭС определена; ее значения, равные значениям  $(S_{\text{о}})_i$ , приведены в табл. 2.

В материалах ОАО НИАЭП представлены результаты четырех вариантов оценки диаметра карстово-суффозионных воронок. На наш взгляд, наиболее приемлемым для промплощадки, где проявлений карста на земной поверхности нет, служит расчетный вариант, так как при этом учитываются заметно отличающиеся от прилегающей территории состояние, свойства грунтов и, главное, геологическое строение массивов-оснований энергоблоков 1 и 2.

В табл. 3 приведены наибольшие расчетные значения диаметра провалов, полученные в ходе изысканий по методике В.П. Хоменко [18]. Видно, что даже в этом случае  $(S_{\text{в}} = \max)$  соотношение  $S_{\text{в}}/(S_{\text{ф}})_i$  существенно меньше 0.1. Тогда, ориентируясь на величину  $S_{\text{в}}/(S_{\text{ф}})_i < 0.1$  и учитывая, что

согласно конструктивным решениям устойчивость основных сооружений НИАЭС заметно больше устойчивости типовых монолитных зданий гражданского назначения, находим по Рекомендациям [11, с. 42], что уязвимость всех четырех объектов одинакова и равна  $(V_{\text{о}})_{1,2,3,4} = V_{\text{о}} = 0.002$ .

Подставляя найденное таким образом значение  $V_{\text{о}} = 0.002$  и значения  $(\lambda^*_{\text{о}})_{1,2,3,4}$ , показанные в табл. 2, в (11), видим, что ежегодный риск запроектных аварий главных сооружений лежит в интервале  $(R_{\text{а}})_{1-4} = 4.2 \cdot 10^{-8} - 1.7 \cdot 10^{-7}$  год<sup>-1</sup> (табл. 4). Эти значения в 5.9-23.8 раза меньше допустимой величины  $(R_{\text{а}})_{\text{доп}} = (\lambda^*_{\text{а}})_{\text{доп}} = 10^{-6}$  год<sup>-1</sup>.

Что касается выбросов радиации, то допустимое для них значение  $(R_{\text{р}})_{\text{доп}} = (\lambda^*_{\text{р}})_{\text{доп}} = 10^{-7}$  год<sup>-1</sup> всего в 1.68 раза больше риска запроектных аварий реакторного отделения, равного  $(R_{\text{а}})_1 = 5.9 \cdot 10^{-8}$  год<sup>-1</sup> (см. табл. 4). Отличие не настолько велико, чтобы с уверенностью судить о радиоактивной безопасности объекта.

Заметим, однако, что риск  $(R_{\text{а}})_1$  – это вероятность разрушения только реакторного здания. А выбросы радиации возможны лишь в результате разрушения корпуса реактора, который находится внутри этого здания и характеризуется своей собственной устойчивостью к внешним воздействиям. Вероятность же совместного наступления этих двух событий – разрушения и здания  $(R_{\text{а}})_1$ , и корпуса реактора  $R_{\text{к.р}}$  воронкой, вследствие чего и происходит радиоактивный выброс, находится по правилу умножения вероятностей [7]. Поэтому, даже не зная точно величину физической уязвимости корпуса реактора для провалов, но уверенно полагая, что она достаточно мала, можем смело

утверждать, что произведение вышеназванных вероятностей будет во много раз меньше значения  $10^{-7} \text{ год}^{-1}$ :  $(R_a)_1 \cdot R_{к.р.} \ll (R_p)_{\text{доп}} = (\lambda^*)_{\text{доп}}$ .

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На площадке размещения основных сооружений ( $S_0 = 3.25 \text{ км}^2$ ) НИАЭС карстово-суффозионные воронки отсутствуют. Однако весь участок проектируемого строительства площадью  $20 \text{ км}^2$  в Навашином районе Нижегородской области находится на территории интенсивного провалообразования, развивающегося в условиях открытого сульфатно-карбонатного карста. В этой связи представляется интересным и важным оценить карстово-суффозионную опасность и устойчивость объектов НИАЭС к провалам не только с детерминированных, но и вероятностно-статистических позиций.

С этих позиций провалы рассматриваются как случайные дискретные события. И главным показателем силы их воздействия на здания и сооружения служит средний или максимальный диаметр воронок. А основным вероятностным показателем — интенсивность их образования, хотя она и является результатом нормирования частоты провалов — первичной вероятностной характеристики процесса — по площади территории. То есть величина интенсивности сильно зависит от того, какой мы представляем себе действующую площадь и как выполняется процедура нормирования (районирования).

В самом общем виде риск потерь от природных опасностей, в том числе и карстово-суффозионной, — это произведение вероятности поражения объекта-реципиента на ущерб от его повреждения или разрушения. Формулы прямого ущерба и экономической уязвимости позволяют с единых позиций оценивать физические и экономические потери от поражения инженерных объектов и территорий геологическими процессами. И если неизвестную, как правило, инженеру-геологу стоимость объекта принять равной 100% или 1, то прямой ущерб становится тождественным уязвимости. При этом для проектируемых или недавно построенных зданий и сооружений значения двух типов уязвимости (физической и экономической) равны друг другу.

В настоящее время используются две стохастические модели провалообразования в карстовых районах: строгая экспоненциальная и приближенная линейная. Последняя дает возможность оценить риск потерь и в том случае, когда эмпирическая дисперсия ежегодного количества провалов не равна его среднестатистическому значению. Но при больших значениях времени прогноза она даже при малой частоте процесса может показывать вероятность  $>1$ . Линейная модель, записанная в виде системы двух уравнений,

лишена этого недостатка и дает значения вероятности провалообразования, практически равные тем, которые получаются с помощью экспоненциальной пуассоновской модели не только при малых, но и больших значениях времени.

В ходе карстологической съемки, выполненной при изысканиях коллективом ФГУП ИМГРЭ, на территории площадью  $S = 50 \text{ км}^2$ , в центре которой находится промплощадка  $S_0 = 3.25 \text{ км}^2$ , зарегистрированы 335 поверхностных форм карста. Они подразделены на: 1) провалы, 2) воронки диаметром  $D \leq 20 \text{ м}$ , 3) воронки диаметром  $D > 20 \text{ м}$  и 4) западины неясного генезиса. К первой группе отнесены 14 разных по форме и размерам воронок с известной датой появления. Все они образовались за время  $T = 53$  года, с 1957 по 2009 г. включительно.

Статистическая обработка фактических данных об этих провалах ( $N = 14$ ) свидетельствует, что на рассматриваемой территории пуассоновский поток событий не имеет места, поэтому для оценки риска запроектных аварий основных сооружений НИАЭС, допустимое значение которого регламентируется нормативными документами по использованию атомной энергии, выбрана не экспоненциальная, а линейная модель. Она записана в виде произведения частоты поражения четырех главных инженерных объектов НИАЭС на их уязвимость.

Значения первого сомножителя в модели риска найдены с использованием второго подхода к стохастическим прогнозам, согласно которому интенсивность  $\lambda = N/TS = 14/(53 \cdot 50) = 0.00528 \text{ год}^{-1} \text{ км}^{-2} = \text{const}$ . Первый подход, базирующийся на предпосылке  $\lambda^* = \text{const}$  (в нашем случае  $\lambda^* = N/T = 14/53 = 0.2642 \text{ год}^{-1}$ ), лежит в основе метода удаленности и региональных оценок карстово-суффозионного риска.

Учет конструктивных особенностей основных объектов НИАЭС и посчитанные соотношения площади их фундаментов и площади возможных на промплощадке воронок позволили определить значения второго сомножителя в уравнении риска — уязвимости объектов, по табличным данным об уязвимости типовых зданий и сооружений. В итоге оказалось, что риск  $(R_a)_{1-4}$  разрушения четырех главных сооружений НИАЭС существенно меньше допустимого риска запроектных аварий  $(R_a)_{\text{доп}}$  объектов атомной энергетики:  $(R_a)_{\text{доп}} / (R_a)_{1-4} = 5.9-23.8$ .

Если же говорить о радиоактивной безопасности участка проектируемого строительства в целом, то можно *a priori* утверждать, что риск выбросов радиации как вероятность совместного наступления двух событий — разрушения и реакторного здания  $(R_a)_1$ , и корпуса реактора  $R_{к.р.}$  воронкой, во много раз меньше допустимого значения риска радиоактивных выбросов, установленного нормативными документами:  $(R_a)_1 \cdot R_{к.р.} \ll (R_p)_{\text{доп}}$ . Таким образом,

и с позиций стохастической оценки карстово-суффозионной опасности площадка размещения основных сооружений НИАЭС, как ни странно, выбрана очень удачно.

*Статья подготовлена в рамках выполнения государственного задания и плана НИР ИГЭ РАН по теме № FMWM-2022-0010.*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Аникеев А.В.* Опасность и риск образования воронок провала и оседания в карстовых районах: основные показатели, подходы и способы оценки // *Инженерная геология*. 2016. № 5. С. 10–18.
2. *Аникеев А.В.* Провалы и воронки оседания в карстовых районах: механизмы образования, прогноз и оценка риска. М.: РУДН, 2017. 328 с.
3. *Викторов А.С.* Основные проблемы математической морфологии ландшафта. М.: Наука, 2006. 252 с.
4. *Глинский М.Л., Егорова В.А., Чертков Л.Г.* Особенности геологического строения участка размещения Нижегородской АЭС и их учет в проектных решениях ее строительства // *Разведка и охрана недр*. 2012. № 10. С. 49–52.
5. *Карстоведение*. Ч. 3. *Инженерное карстоведение*: учеб. пос. / Кол. авт. [В.Н. Дублянский, Г.Н. Дублянская, В.Н. Катаев и др.]. Пермь: Перм. гос. нац. ун-т, 2011. 288 с.
6. *Катаев В.Н., Щербаков С.В., Золотарев Д.Р., Дробинина Е.В.* Оценка карстовой опасности в отложениях мела на примере территории п. Вышкова Брянской области // *Инженерная геология*. Т. XVII. № 3. 2022. С. 44–63.
7. *Малугин В.А.* Теория вероятностей и математическая статистика: учебник и практикум для среднего профессионального образования. М.: Юрайт, 2024. 470 с.
8. *Природные опасности России. Оценка и управление природными рисками*. Тематический том / Под ред. А.Л. Рагозина. М.: Изд. фирма “КРУК”, 2003. 320 с.
9. *Рагозин А.Л.* Современное состояние и перспективы оценки и управления природными рисками в строительстве // *Анализ и оценка природного и техногенного риска в строительстве / Минстрой России*. М.: ПНИИИС, 1995. С. 9–25.
10. *Рагозин А.Л., Елкин В.А.* Региональная оценка карстовой опасности и риска // *Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций*. 2003. № 4. С. 33–52.
11. *Рекомендации по оценке геологического риска на территории г. Москвы / Под ред. А.Л. Рагозина*. М.: Изд-во ГУП НИАЦ, 2002. 59 с. <https://docs.cntd.ru/document/3666750>
12. *Рекомендации по проведению инженерных изысканий, проектированию, строительству и эксплуатации зданий и сооружений на закарстованных территориях Нижегородской области*. Нижний Новгород, 2012. 140 с. <https://docs.cntd.ru/document/465562526>
13. *Саваренский И.А.* Прогноз устойчивости территории методом удаленности от ближайшего проявления карста // *Прогноз изменений инженерно-геологических условий при строительстве*. М.: Наука, 1990. С. 108–118.
14. *Саваренский И.А., Миронов Н.А.* Руководство по инженерно-геологическим изысканиям в районах развития карста. М.: ПНИИИС Госстроя России, 1995. 167 с.
15. *Толмачев В.В.* Вероятностный подход при оценке устойчивости закарстованных территорий и проектировании противокарстовых мероприятий // *Инженерная геология*. 1980. № 3. С. 98–107.
16. ТСН 11-301-2004По. *Инженерно-геологические изыскания для строительства на территории Пермской области*. Пермь, 2004. 122 с. <https://libinfo.org/nsi/index.php?file=c3604011>
17. ТСН 22–308–98 НН. *Инженерные изыскания, проектирование, строительство и эксплуатация зданий и сооружений на закарстованных территориях Нижегородской области*. 1999. 72 с. <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294814/4294814947.pdf>
18. *Хоменко В.П.* Карстовое провалообразование: механизм и оценка опасности // *Экологическая безопасность и строительство в карстовых районах: матер. Межд. симпозиума / Под ред. В.Н. Катаева и др.* Пермь: ПГНИУ, 2015. С. 50–60.
19. *Birkmann J.* Risk // *Encyclopedia of Natural Hazards*. Peter T. Bobrowsky, Ed., Springer, 2013. P. 856–862.
20. *Kalsnes B., Nadim F., Lacasse S.* Managing geological risk // *Geologically Active / A.L. Williams, G.M. Pinches, C.Y. Chin et al. (eds)*. London: CRC Press, 2010. P. 111–126.

## PROBABILISTIC-STATISTICAL ASSESSMENT OF KARST AND SUFFOSION HAZARD AND RISK OF DESTRUCTION BY SINKHOLES OF THE MAIN FACILITIES AT THE NIZHNY NOVGOROD NPP

A. V. Anikeev<sup>a, #</sup>

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

<sup>#</sup>*E-mail: anikeev\_alex@mail.ru*

In the mathematical description of sinkhole distribution with time, sinkholes are considered as random discrete events. The diameter of funnels is the main indicator of sinkhole impact power on the environment, and the intensity of sinkhole occurrence is the main probabilistic index. Most generally, the risk of losses from karst-suffosion sinkholes is the product of subsidence probability by the damage caused by a recipient object deformation or destruction. Formulas of direct damage and vulnerability have been derived, allowing for a unified assessment of physical and economic losses from damage to engineering and territorial facilities

caused by geological processes. Two currently used stochastic models of sinkhole formation in covered karst areas are considered, i.e. exponential and linear models. It is shown that with the intensity of the process and the area of risk recipients less than  $0.1 \text{ year}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$  and 10 ha, respectively, these models give close values of the probability of damage to recipient objects. The linear model, written as a system of two equations, is devoid of some of its disadvantages and allows one to predict the risk of losses in case of non-compliance with Poisson's law. In the article, the assessment of the risk of radioactive emissions and out-of-design accidents at the site of the projected NNPP power units is based on data obtained during surveys on 14 sinkholes formed over 53 years in an area of  $50 \text{ km}^2$ , in the center of which the industrial site is located. The Poisson flow of events is found to take no place in this area, and a linear risk model has been chosen for the forecast, written as the product of the frequency of sinkholes occurrence under the four main structures of the NNPP by their vulnerability. Taking into account some assumptions and design features of engineering facilities, it is shown that the risk of their beyond-design accidents and the risk of radiation emissions at the industrial site are many times less than their permissible values specified by regulatory documents on the use of atomic energy in Russian Federation.

**Keywords:** *damage, hazard, karst, karst-suffosion sinkholes, nuclear power plant, Poisson's law, risk, stochastic models, vulnerability*

## REFERENCES

- Anikeev, A.V. [Sinkhole hazard and risk of its formation in karst areas: main indices, approaches and methods of evaluation]. *Inzhenernaya geologiya*, 2016, no. 5, pp. 10–18 (in Russian)
- Anikeev, A.V. [Collapse and subsidence sinkholes in karst areas: mechanisms of formation, forecast and risk assessment]. Moscow, RUDN Publ., 2017, 328 p. (in Russian)
- Viktorov, A.S. [The main problems of mathematical morphology of the landscape]. Moscow, Nauka Publ., 2006. 252 p. (in Russian)
- Glinskii, M.L., Egorova, V.A., Chertkov, L.G. [Geological structure specifics at the location of the Nizhni Novgorod NPP and their consideration in the design solutions for its construction]. *Razvedka i okhrana nedr*, 2012, no.10, pp. 49–52. (in Russian)
- [Karstology. Part 3. Engineering karstology: a textbook]. V.N. Dublyanskii, G.N. Dublyanskaya, V.N. Kataev, et. al. Perm, Perm State National University, 2011, 288 p. (in Russian)
- Kataev, V.N., Shcherbakov, S.V., Zolotarev, D.R., Drobinina, E.V. [Karst hazard assessment in chalk deposits on the example of Vyshkov settlement, Bryansk oblast]. *Inzhenernaya geologiya*, 2022, vol. XVII, no. 3, pp. 44–63. (in Russian)
- Malugin, V.A. [Probability theory and mathematical statistics: textbook and workshop for secondary professional education]. Moscow, Yurait Publ., 2024, 470 p. (in Russian)
- [Natural hazards in Russia. Assessment and management of natural risks. Thematic volume]. A.L. Ragozin, Ed., Moscow, KRUK Publ., 2003, 320 p. (in Russian)
- Ragozin, A.L. [Current state and prospects of assessment and management of natural risks for construction]. In: [Analysis and assessment of natural and human-induced risk for construction]. Moscow, PNIIS, 1995, pp. 9–25. (in Russian)
- Ragozin, A.L., Yolkin, V.A. [Regional assessment of karst hazard and risk]. *Problemy bezopasnosti i chrezvychaynykh situatsii*. 2003, no. 4, pp. 33–52. (in Russian)
- [Recommendations for the assessment of geological risk in the territory of Moscow]. A.L. Ragozin, Ed. Moscow, GUP NIATs Publ., 2002, 59 p. (in Russian)
- [Recommendations for engineering survey, design, construction and the operation of buildings and engineering structures in karst-prone areas of the Nizhny Novgorod region]. Nizhny Novgorod, 2012, 140 p. (in Russian)
- Savarenskii, I.A. [The forecast of territory stability by the method of remoteness from the nearest karst manifestation]. In: [Forecast of changes in engineering and geological conditions upon construction]. Moscow, Nauka Publ., 1990. pp. 108–118. (in Russian)
- Savarenskii, I.A., Mironov, N.A. [Guidelines for engineering and geological surveys in karst development areas]. Moscow, PNIIS, Gosstroj of Russia, 1995, 167 p. (in Russian)
- Tolmachev, V.V. [A probabilistic approach to assessing the sustainability of karst areas and designing karst-control measures]. *Inzhenernaya geologiya*, 1980, no. 3, pp. 98–107. (in Russian)
- TSN 11-301-2004Po. [Regional construction standards 11-301-2004Po. Engineering geological survey for construction in the territory of Perm region]. Perm, 2004, 122 p. (in Russian)
- TSN 22-308-98 NN. [Regional construction standards 22-308-98 NN. Engineering survey, design, construction and the operation of buildings and engineering structures in karst-prone areas of the Nizhny Novgorod region]. 1999. 72 p. (in Russian)
- Khomenko, V.P. [Karst sinkhole formation: mechanism and hazard assessment]. In: [Environmental safety and construction in karst areas. Proc. Int. Symp.]. V.N. Kataev et al., Eds., Perm, Perm State University, 2015, pp. 50–60. (in Russian)
- Birkmann, J. Risk. In: Encyclopedia of natural hazards. P.T. Bobrowsky, Ed., Springer, 2013, pp. 856–862.
- Kalsnes, B., Nadim, F., Lacasse, S. Managing geological risk. In: Geologically active. A.L. Williams, G.M. Pinches, C.Y. Chin et al., Eds. London, CRC Press, 2010, pp. 111–126.

## ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ ПРИРОДНЫХ И ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 551.34:624.139

### ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ НА УЧАСТКЕ ФЕДЕРАЛЬНОЙ АВТОМОБИЛЬНОЙ ДОРОГИ “АМУР” ЧИТА–ХАБАРОВСК

© 2024 г. А. Н. Хименков<sup>1,\*</sup>, А. П. Кулаков<sup>1,\*\*</sup>, А. В. Романов<sup>2</sup>, Д. О. Сергеев<sup>1,\*\*\*</sup>

<sup>1</sup>Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН,  
Уланский пер. 13, стр. 2, Москва, 101000 Россия

<sup>2</sup>ФКУ Упрдор “Забайкалье”, ул. Анохина 17, Чита, Забайкальский край, 672039 Россия

\*E-mail: a\_khimenkov@mail.ru

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

\*\*\*E-mail: cryo2@yandex.ru

Поступила в редакцию 07.06.2024 г.

После доработки 12.07.2024 г.

Принята к публикации 20.07.2024 г.

В работе рассмотрены особенности изменения геокриологических условий на участке 288 км автодороги “Амур” Чита–Хабаровск. Проведен комплексный анализ криогенных процессов и деформаций земляного полотна в условиях формирования и функционирования особой природно-технической системы (ПТС) “автомобильная дорога”. Составлена ландшафтно-геокриологическая карта-схема с границами ПТС и зон влияния. Построен инженерно-геокриологический профиль деформированного участка автодороги на основании семи пробуренных скважин глубиной от 7.5 м до 30 м. Проведены термометрические наблюдения в пяти скважинах с изучением особенностей распределения температур под полотном автодороги и вблизи нее. Исследования показали, что причинами деформаций земляного полотна являются неоднородные, разнонаправленные и неравномерные изменения геокриологических условий в результате пространственно-временного развития взаимообусловленных природных и техногенных процессов в ПТС. Предложен ряд системных организационных мероприятий по контролю изменений геокриологических условий и развития ПТС “автомобильная дорога” на локальных участках.

**Ключевые слова:** автомобильная дорога Амур, деформации земляного полотна, криогенные процессы, криолитозона, многолетнемерзлые породы, природно-техническая система

DOI: 10.31857/S0869780924060036 EDN: AMCKXD

#### ВВЕДЕНИЕ

Организация линейных объектов в условиях многолетнемерзлых пород (ММП) непосредственно влияет на геокриологические условия и создает особую природно-техническую систему (ПТС) со своими функциональными связями и развитием геокриологических процессов. Автодороги протяженностью в сотни и тысячи километров пересекают зоны с различными географо-геологическими и геокриологическими условиями, отличающиеся криогенным строением, льдистостью и температурным режимом горных пород. В результате сооружения земляного полотна меняется теплообмен горных пород, и происходит изменение геокриологических условий. Это влечет за собой резкую активизацию криогенных процессов, вызывающих деформацию самого земляного полотна автодороги.

С момента сдачи в эксплуатацию автомобильной дороги “Амур” в сентябре 2010 г. уже в следующем году 263 км (12.1%) дороги нуждались в капитальном ремонте, а около 400 км (18.5%) – в реконструкции. Основные причины деформации дороги различны: осадки земляного полотна, оползни и сдвиги, широкие трещины и др. Наибольшую опасность представляли осадки земляного полотна. Их количество в 2011 г. составило 68 шт., а уже в 2012 г. увеличились до 327 шт. Отмечается, что затраты на устранение 1 м<sup>2</sup> осадок с каждым годом становятся больше [5].

Другие исследования подтверждают, что существующие проблемы характерны не только для южной границы криолитозоны, где располагается автодорога “Амур”, но и для регионов с низкими температурами ММП. Например, на участке Норильск–Талнах деформации дорог составляют половину их протяженности. Они

связаны преимущественно с осадками полотна, трещинами асфальтового покрытия и обочин, эрозией и оседанием откосов насыпей. На каждые 3 км дороги приходился один участок, небезопасный для движения транспорта [2]. На автодороге “Колыма” 37 км из обследованных 718 км в 2011–2012 гг. оказались в зоне негативного влияния криогенных процессов [3]. К 2000 г. более 60% автодорог Чукотского автономного округа нуждались в реконструкции. Высота их земляного полотна из-за осадок стала в два раза ниже, чем заложенная по проекту, а в 15% находилась уже на “нулевых” отметках и под нагрузкой от автотранспортных средств продолжала погружаться. На севере Западной Сибири наблюдалось быстрое (за 3–4 года) массовое разрушение земляного полотна из высокопрочных, армированных железобетонных плит, рассчитанных на 25-летний безремонтный срок эксплуатации. Основными причинами разрушения стали неравномерные и сверхнормативные осадки дорожных насыпей [1].

Как показывает практика, интенсивные деформации автодорог возобновляются и после проведения ремонтно-восстановительных работ, базирующихся на приведении земляного полотна в исходное состояние без учета нынешних особенностей ландшафтно-геокриологических условий. Причиной повторных деформаций является активизация процессов, соответствующих структурной перестройке во вновь сформированной ПТС. Происходит ее адаптация к измененным геокриологическим условиям, при этом наблюдается потеря устойчивости технического элемента, фиксируется резкое возрастание деформаций земляного полотна. Исследования по изучению изменений геокриологических условий в процессе мониторинга всех компонентов ПТС являются наиболее эффективным направлением в повышении надежности функционирования автодорог.

### ТЕРРИТОРИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

К территории исследования относится район 288 км автодороги “Амур” Чита–Хабаровск. Для района характерны высокотемпературные ММП (до  $-1^{\circ}\text{C}$ ), мощностью до 100 м, имеющие сплошное и прерывистое (50–90%) распространение с наличием сквозных и несквозных таликовых зон по днищам долин. Преимущественное распространение имеют четвертичные аллювиальные, озерно-аллювиальные, пролювиальные, делювиальные, коллювиальные и элювиальные песчано-гравийные, суглинистые, супесчаные и щебнистые отложения с выходами меловых песчаников [4]. Рельеф территории низкогорный холмистый и волнисто-увалистый с межгорными котловинами и пенепленами. В районе преобладает резко-континентальный тип климата, а количество осадков в год составляет в среднем 400 мм [4, 7]. Среднегодовые температуры воздуха колеблются от  $-2.5^{\circ}\text{C}$  до  $-3.8^{\circ}\text{C}$ . В течение

апреля амплитуда максимальных и минимальных абсолютных температур воздуха способна достигать  $45^{\circ}\text{C}$ . Мощность снежного покрова в среднем не превышает 35 см [7]. На территории преобладает степная растительность на горно-луговых почвах, в понижениях и западинах появляются лугово-степные формации на дерново-глеяных почвах, в долинах крупных рек доминируют кустарники на аллювиальных почвах, а на склонах северной экспозиции произрастают лиственнично-березовые леса на мерзлотно-таежных почвах. В районе распространены криогенные (в большей степени термокарст, морозобойное растрескивание и повторно-жильное льдообразование, наледеобразование) и эрозионные процессы, а на склонах водоразделов – оползневые процессы [4].

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Основу исследования составили дистанционные и полевые работы. Изучены тематические литературные источники и карты по Южному Забайкалью (Государственные геологические карты России масштаба 1 : 200 000, геокриологические и физико-географические карты), проанализированы фондовые инженерно-геологические и отчетные материалы по автодороге “Амур”. Проведено дешифрирование разновременных космических снимков Landsat-8 и Sentinel-2, взятых с USGS, а также снимков с порталов ESRI, Google и Yandex.

В полевых условиях проводились маршрутные исследования с изучением состояния земляного полотна. Отмечалась зона взаимовлияния автодороги и природных геосистем. Проведена съемка местности с беспилотного летательного аппарата (БПЛА). Пробурены пять термометрических и две гидрогеологические скважины от 7.5 м до 30 м с отбором кернов на лабораторный анализ. Изучен состав, строение и инженерно-геокриологические свойства криогенных грунтов. В пяти термометрических скважинах получены данные о распределении температур под полотном автодороги и вблизи нее. На основании полученных данных в программе ArcGIS построен инженерно-геокриологический профиль и составлена ландшафтно-геокриологическая карта-схема по методологическим основам Н.А. Солнцева [6].

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При формировании ПТС “автомобильная дорога” географо-геологические (рельеф, растительность, поверхностный и подземный сток) и геокриологические (свойства ММП, температурный режим, льдистость, сезонно-талый и сезонно-мерзлый слой, несливающаяся мерзлота) условия значительно меняются во времени и пространстве. На участках, непосредственно примыкающих к земляному

полотну, формируется зона влияния, являющаяся важным элементом ПТС. В свою очередь, техногенные объекты земляного полотна (основания и откосы насыпи, выемки, водопропускные сооружения, мосты и т.д.) и природные грунты в их основании претерпевают изменения в результате взаимообусловленных природных и техногенных процессов, развивающихся в зоне влияния ПТС. То есть происходит своего рода взаимная адаптация техногенных и природных элементов ПТС иногда с потерей функций техногенной составляющей. В ПТС создаются неравновесные термодинамические условия, определяющие развитие комплекса теплообменных и массообменных инженерно-геокриологических процессов, приводящих к деформациям земляного полотна.

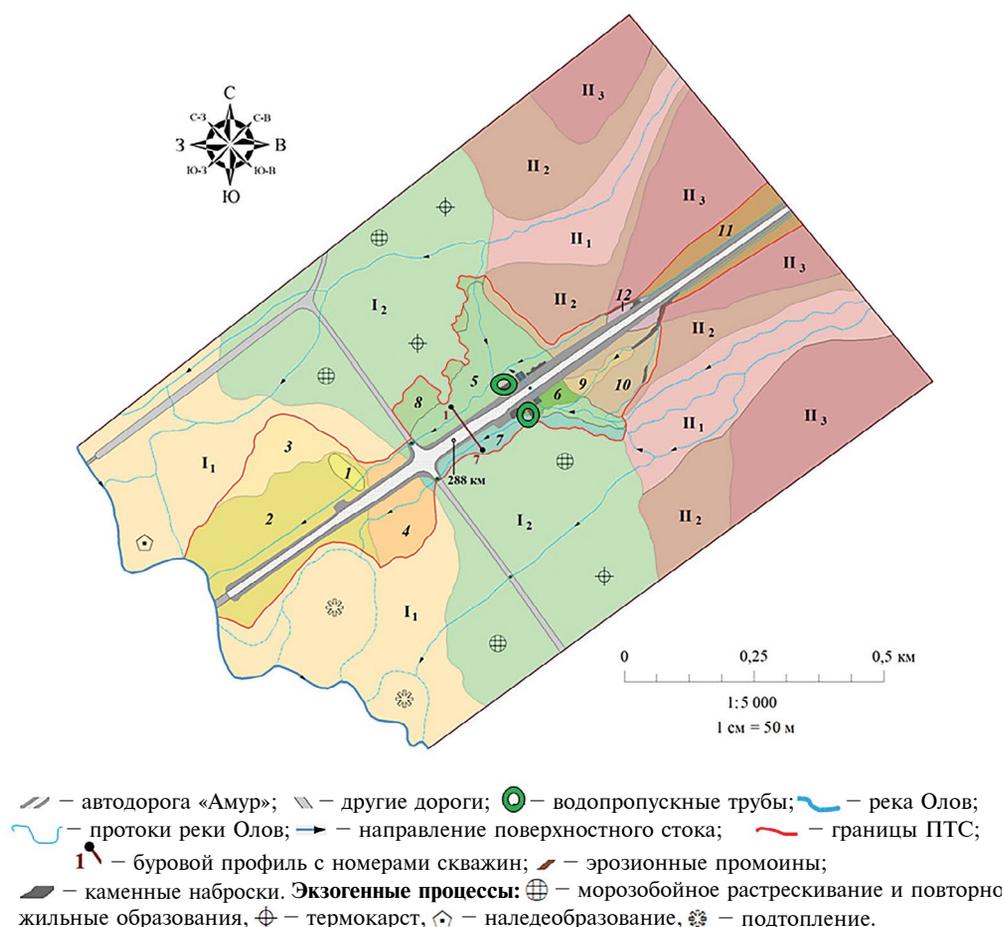
В результате исследований удалось выявить, что сооружение земляного полотна приводит к значительным изменениям геокриологических условий на прилегающих к полотну участках и вызывает активизацию в их пределах опасных криогенных процессов. Здесь формируется узкая зона интразональных геосистем, отличающихся большей динамикой от территорий, не затронутых техногенным влиянием. Данные геосистемы

возникают тогда, когда какой-либо из факторов (в нашем случае ПТС “автомобильная дорога”) настолько сильно выражен, что подавляет влияние других факторов (например, микроклимата). В результате формируется зона производных геосистем, в которых наблюдается трансформация первичной структуры исходной природной геосистемы соответствующего ранга.

В районе исследования 288 км автодороги “Амур” проведены ландшафтно-геокриологические исследования и составлена карта-схема (рис. 1), на которой выделены природные геосистемы на уровне сложных урочищ, а также производные геосистемы, соответствующие зоне влияния ПТС с указанием ведущих процессов.

Анализ ландшафтно-геокриологической структуры позволил выявить пространственную закономерность расположения опасных участков, характеризующихся, в первую очередь, повторяемостью криогенных процессов и частотой деформаций земляного полотна.

Наиболее опасные участки занимают отрицательные формы рельефа и характеризуются натечным водным режимом в условиях слабого дренажа



**Рис. 1.** Ландшафтно-геокриологическая карта-схема района исследования 288 км автодороги “Амур”. Прочие условные обозначения см. табл. 1 (составил А.П. Кулаков).

**Таблица 1.** Условные обозначения к ландшафтно-геокриологической карте-схеме (см. рис. 1)

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ	
<b>I. Долина р. Орлов</b>	
<b>I<sub>1</sub>. Субгоризонтальная пойма.</b> ММП прерывистые. Криотекстура массивная, корковая с объемной льдистостью 0.1–0.3 доли ед. Глубина СТС 1–3 м. Растительность луговая, вдоль русел кустарниковая. Почвы дерново-глеевые мерзлотные и аллювиальные	
<i>Производные геосистемы I<sub>1</sub></i>	
1. Ложбинные (усиление подтопления и заболачивания, активизация термокарста по погребенным льдам)	
2. Плоскозападинные (усиление подтопления и заболачивания, криогенного пучения и наледеобразования)	
3. Слабоволнистые (усиление подтопления)	
4. Плоскобугристые слабоогнутые (усиление поверхностного стока, активизация эрозии)	
<b>I<sub>2</sub>. Плоскобугристая полигональная надпойменная терраса.</b> ММП сплошные. Криотекстура массивная, порфириовидная с объемной льдистостью 0.2–0.4 доли ед. Глубина СТС 2.5–4 м с перелетками до 7 м. Растительность разнотравно-злаковая. Почвы дерново-луговые мерзлотные	
<i>Производные геосистемы I<sub>2</sub></i>	
5. Пологонаклонные и бугристо-западинные (усиление поверхностного стока и заболачивания, морозобойного растрескивания, активизация термокарста по повторно-жильным льдам и эрозии, появление трещин и перелетков ММП)	
6. Ложбинные (усиление поверхностного стока, эрозии)	
7. Плоскобугристые (усиление поверхностного стока)	
8. Бугорковато-западинные (усиление поверхностного стока и заболачивания, активизация термокарста по повторно-жильным льдам, появление трещин и озерков)	
<b>II. Коренные склоны долины</b>	
<b>II<sub>1</sub>. Пологонаклонные днища балок.</b> ММП сплошные. Криотекстура массивная, корковая с объемной льдистостью 0.1–0.3 доли ед. Глубина СТС 2.5–3.5 м. Растительность луговая, местами кустарниковая. Почвы луговые мерзлотные. Экзогенные процессы — эрозия, поверхностный смыл	
<b>II<sub>2</sub>. Пологие склоны долины.</b> ММП сплошные. Криотекстура корковая, тонкая линзовидная с объемной льдистостью 0.1–0.2 доли ед. Глубина СТС 2.5–3.5 м. Растительность дерновинно-злаковая. Почвы горно-луговые мерзлотные	
<i>Производные геосистемы II<sub>2</sub></i>	
9. Пологосклонные плосколожбинные (усиление поверхностного стока, активизация эрозии, появление конусов выноса)	
10. Пологосклонные выпукло-вогнутые (усиление поверхностного стока, активизация эрозии)	
<b>II<sub>3</sub>. Крутопокатые склоны долины.</b> ММП сплошные. Криотекстура корковая, льдистость 0.1–0.2 доли ед. Глубина сезонно-талого слоя 2.5–3.5 м. Растительность дерновинно-злаковая на освещенных склонах, лугово-лесная на затененных склонах. Почвы горно-луговые и мерзлотно-таежные	
<i>Производные геосистемы II<sub>3</sub></i>	
11. Трапецевидные выемки со склонами 40° (активизация поверхностного стока и эрозии, появление трещин отседания)	
12. Покатые склоны (активизация поверхностного стока и эрозии)	

подстилаемых суглинистых грунтов. К таким участкам относятся низкие поймы и присклоновые западины надпойменных террас, а также днища ложбин стока и падей. Для них характерно наличие луговых и влаголюбивых травянистых видов растительности, а в почвах отмечаются признаки оглеения и оторфованности. Здесь чаще всего повторяются криогенные процессы в виде морозобойного растрескивания и повторно-жильного льдообразования, криогенного пучения и наледеобразования. На поверхности диагностируются криогенные формы рельефа в виде сезонных бугров пучения, термокарстовых западин, кочек, озерков и морозобойных трещин. Нарушения поверхностного и подземного стока в пределах I надпойменной террасы приводят к активизации термокарста и вытаиванию льдистых горизонтов, наблюдаются осадки земляного полотна (рис. 2).

Ключевой участок исследования 288 км, где проводились основные буровые работы, расположен в пределах I надпойменной террасы левого берега р. Олов. Рельеф участка плоскобугристый, с небольшим уклоном в сторону реки. На поверхности четко выражен полигональный микрорельеф с трещинами и повторно-жильными льдами (ПЖЛ). К северу от дороги поверхность ложбинная, вогнутая, с юга — бугристая, приподнятая. Участок располагается вблизи южной границы криолитозоны и характеризуется высокими отрицательными температурами, не опускающимися ниже  $-0.5^{\circ}\text{C}$  (рис. 3). Мощность сезонно-талого слоя (СТС) на участке достигает 3.5–4 м.

На рис. 4 показано изменение положения верхней границы ММП под дорогой и в непосредственной близости от нее. Под дорогой наблюдается ее общее понижение. В распределении измеренных температур в грунтах под автодорогой наблюдается значительная дифференциация. Под северным склоном насыпи, менее подверженным воздействию солнечных лучей, граница ММП оказалась приподнятой и проходит на глубине около 7 м (см. скв. 3). Под южным склоном наоборот опустилась. По изменению температуры в скв. 4 можно судить, что грунт оттаял более чем на 9 м (см. рис. 3, 4).

Наблюдается значительное различие геокриологических условий на участках, примыкающих к автодороге. Вплотную к северной части дороги сток воды затруднен. Здесь, вдоль дороги, сформировались поверхностные водоемы и увлажненные понижения, начали протаивать повторно-жильные льды (рис. 5). На южном участке, примыкающем к дороге, активизации криогенных процессов не наблюдается (см. рис. 5). Сохраняется первичный растительный покров, отсутствуют выраженные в рельефе термокарстовые западины и открытые водоемы.

Нарушение поверхностного стока и развитие термокарста отразилось на распределении температур в грунтах. На северном увлажненном участке положительные температуры грунтов прослеживаются на глубину 8–9 м (см. рис. 3, скв. 2, 3). На южном участке оттаивало не более 3–3.5 м (см. рис. 3, скв. 5, 6), т.е. глубина не превышала мощности деятельного слоя.



Рис. 2. Осадки земляного полотна на ключевом участке 288 км автодороги “Амур” (фото Р.Р. Давлетовой).

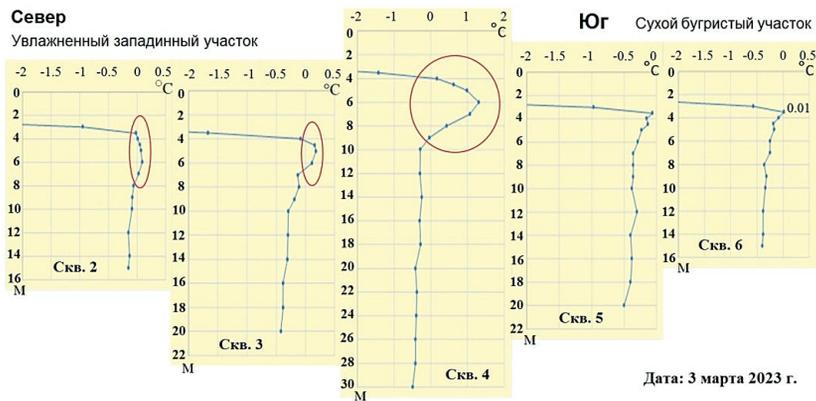


Рис. 3. Распределение температур по глубине в скважинах, пробуренных на ключевом участке 288 км автодороги “Амур”.

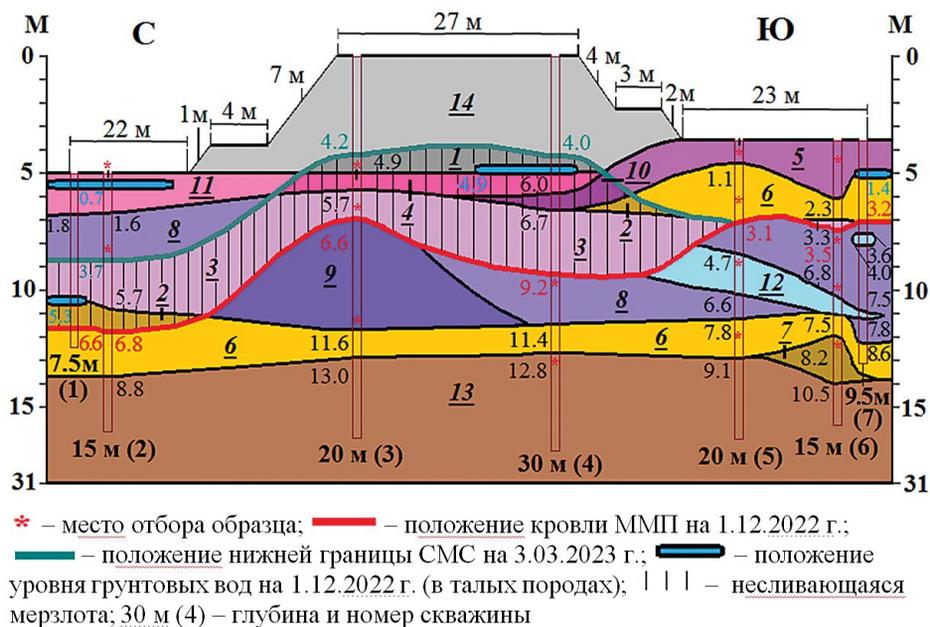


Рис. 4. Инженерно-геокриологический профиль ключевого участка 288 км автодороги “Амур” Прочие условные обозначения см. табл. 2 (составил А.П. Кулаков).

Строительство автодороги коренным образом изменило строение ММП в районе автодороги. В результате превышения мощности оттаивших пород над мощностью промерзающих пород между сезонно-мерзлым слоем (СМС) и ММП сформировался горизонт несливающей мерзлоты. Даже в зимний период между промерзшим слоем и верхней границей ММП постоянно существует талый горизонт, круглогодично оказывающий отепляющее воздействие на подстилающую кровлю ММП. Кроме того, данный горизонт является каналом перераспределения грунтовых вод, особенно в условиях подстилающей насыпи, сложенной грубозернистым материалом. Обследования проседающих участков автодороги “Амур” выявили, что более чем в 90% случаев имелось наличие воды у оснований откосов земляного полотна. В ряде случаев, течение воды осуществлялось

вдоль и внутри проседающих участков, в том числе и с фильтрацией через тело насыпи по ее основанию. Попадание воды через водопроницаемые грунты нижней части насыпи к мерзлому основанию вызывает значительное ослабление прочностных характеристик слагающих его грунтов, особенно пылеватых и глинистых, как в прослойках, так и в мелкоземах заполнителей. При этом постепенно создается нарастающее (сверхнормативное) термокарстовое оттаивание за счет дополнительного привноса тепла с водой. Также возрастает и тиксотропность оттаивших и еще не уплотнившихся грунтов основания, т.е. их способность к разжижению при динамических воздействиях.

При общей тенденции формирования чаши оттаивания под земляным полотном наблюдается

Таблица 2. Условные обозначения на профиле (рис. 4)

<b>УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ НА ПРОФИЛЕ</b>	
<b>Талые грунты</b>	
<i>Технические грунты</i>	
<u>1.</u> Дресвяно-щебнистые грунты насыпи	
<i>Природные грунты</i>	
<u>2.</u> Песок гравелистый водонасыщенный	
<u>3.</u> Суглинок песчанистый пластичный	
<u>4.</u> Суглинок с органикой пластичный	
<u>5.</u> Суглинок песчанистый с органикой твердый	
<b>Мерзлые грунты</b>	
<i>Природные грунты</i>	
<u>6.</u> Песок гравелистый сыпучемерзлый льдистый, при оттаивании водонасыщенный	
<u>7.</u> Песок пылеватый твердомерзлый льдистый, при оттаивании водонасыщенный	
<u>8.</u> Суглинок песчанистый пластичномерзлый льдистый, при оттаивании текучий	
<u>9.</u> Суглинок песчанистый твердомерзлый, при оттаивании твердый	
<u>10.</u> Суглинок с органикой твердомерзлый, при оттаивании пластичный	
<u>11.</u> Суглинок с органикой пластичномерзлый, при оттаивании текучий	
<u>12.</u> Ледогрунт суглинистый, при оттаивании текучий	
<u>13.</u> Глина твердомерзлая, при оттаивании твердая	
<i>Технические грунты</i>	
<u>14.</u> Дресвяно-щебнистые твердомерзлые грунты насыпи, при оттаивании твердые	

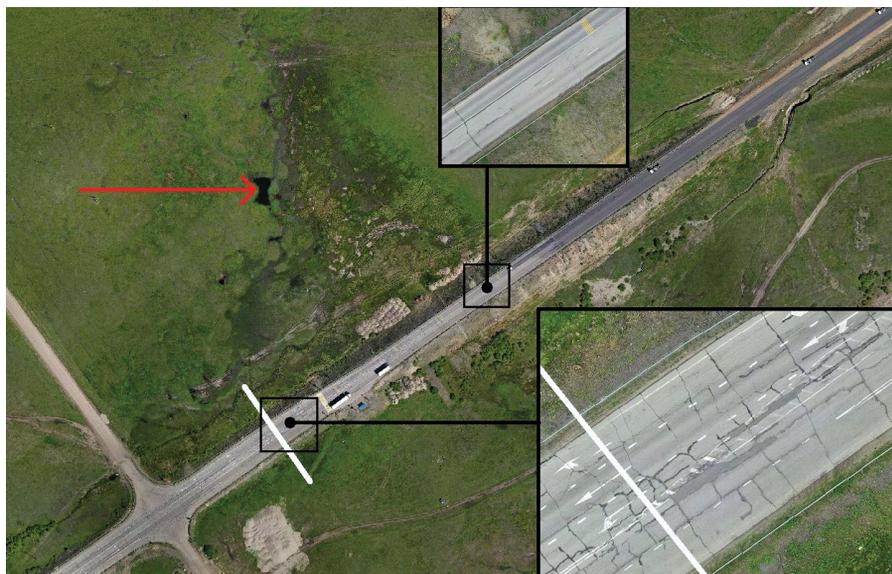
дифференциация мощности слоя несливающейся мерзлоты. Под северным склоном насыпи, где прогрев грунтов минимален, его верхняя граница поднялась почти до основания насыпи, и мощность слоя несливающейся мерзлоты составляет до 2.4 м. К югу в пределах насыпи она увеличивается до 5.2 м (см. рис. 3, 4)

Оттаивание ММП под насыпью приводит к неравномерным просадкам земляного полотна. Его южная часть деформируется интенсивней северной части. Этому способствует вытаивание льдистого горизонта, залегающего на глубине около 6 м. Его фрагменты на глубинах 5–7 м обнаружены в непосредственной близости под южной частью насыпи (см. рис. 3, скв. 5, 6). В северной части дорожного полотна из-за повышения уровня ММП просадки менее выражены.

Изменение условий теплообмена приводит, в одних случаях, к протаиванию льдистых

грунтов и просадкам, в других — может привести к промерзанию талых грунтов и криогенному пучению. Данная разнонаправленность криогенных процессов может реализовываться даже на близлежащих участках, что и было зафиксировано в работе. На северном участке организация земляного полотна привела к концентрации поверхностного стока, здесь наблюдалось обводнение территории и, как следствие, активное развитие термокарста. ММП протаяли до глубины 10 м.

На территории, примыкающей к земляному полотну с юга, обводнения поверхности не произошло. Признаков активизации термокарста не выявлено, хотя, судя по наличию полигонального рельефа, повторно-жильные льды присутствуют. Вследствие лучшей дренированности грунты промерзают на большую глубину и имеют самые низкие температуры, значения которых приближаются к  $-0.5^{\circ}\text{C}$ . Вследствие этого, слой несливающейся мерзлоты здесь отсутствует (см. рис. 3, 4).



**Рис. 5.** Распределение трещин на полотне и место развития термокарстового процесса по повторно-жильным льдам (показано стрелкой) вдоль автодороги “Амур” (288 км). Белая линия соответствует положению бурового профиля. Снимок с БПЛА, июнь 2022 г.

На поверхности дорожного покрытия вследствие температурных напряжений и динамических нагрузок от проезжающего транспорта формируется сеть трещин, имеющих довольно равномерное распределение. В местах развития осадок земляного полотна сеть трещин сгущается, расстояния между ними резко уменьшаются (рис. 5). Таким образом, участки сгущения трещин на поверхности полотна автодороги могут являться индикаторами активизации термокарстовых процессов в теле насыпи или подстилающих мерзлых породах.

В целом, на исследуемом участке общая направленность криогенных процессов выражается в поступательном оттаивании ММП. При этом существуют условия для сохранения ММП или ослабления ее деградации.

Рассмотренные выше деформации земляного полотна вызваны развитием не одного, а целого комплекса взаимообусловленных “цепочечных” природных и техногенных процессов. Важный показатель реакции геокриологических условий (и соответственно теплообмена) на техногенные изменения – парагенезис взаимообусловленных природных и техногенных процессов. Он проявляется в том, что в некоторый интервал времени, под воздействием техногенного фактора, одновременно начинают формироваться или резко активизироваться несколько процессов, каждый из которых, создав на определенном этапе своего развития условия для появления другого, сам при этом не завершается. Этого может привести к резкой дифференциации интенсивности и неравномерности их развития и негативного воздействия на инженерные сооружения. Данное

обстоятельство затрудняет прогнозирование изменения инженерно-геокриологических условий в районе эксплуатации автомобильных дорог в области распространения многолетнемерзлых пород.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования показали, что формирование ПТС автомобильных дорог, проложенных на территориях распространения многолетнемерзлых пород, обусловлено взаимодействием многочисленных и порой разнонаправленных процессов. Их различные сочетания могут приводить как к ослаблению воздействия на инженерные сооружения и прилегающие к автомобильной дороге территории, так и к возрастанию интенсивности термоденудации. Комплекс криогенных процессов настолько разнообразен, а синергетические эффекты их взаимодействия настолько велики, что спрогнозировать суммарное деформирующее воздействие на дорожное полотно в пределах локальных участков, в настоящее время, весьма затруднительно. Это осложняет разработку рекомендаций, основанных на традиционных детерминистских подходах, базирующихся на учете теплообменных процессов.

Причинами деформаций земляного полотна на участке 288 км автодороги “Амур” являются неоднородные, разнонаправленные и неравномерные изменения геокриологических условий в результате пространственно-временного развития взаимообусловленных природных и техногенных процессов в ПТС.

Для контроля изменений геокриологических условий и развития ПТС “автомобильная дорога”

предлагается ряд следующих системных организационных мероприятий:

- выявление потенциально опасных участков, выделяемых по наличию деформаций дорожного полотна и развитию комплекса термоденудационных процессов на прилегающих территориях;
- проведение на них дополнительных инженерно-геокриологических исследований по выявлению параметров мерзлых толщ (мощность, льдистость, температура, наличие слоя несливающейся мерзлоты и др.;
- построение ландшафтной карты-схемы с выделением зоны влияния автомобильной дороги и указанием характеристик первичных и нарушенных условий;
- разработка рекомендаций по проведению восстановительных работ на нарушенных участках инженерных сооружений;
- установка контрольной аппаратуры для анализа эффективности проведенных работ.

Рассмотренный комплекс мероприятий может быть использован на разных стадиях жизненного цикла ПТС автомобильных дорог: при проектировании в сложных инженерно-геокриологических условиях, на участках повышенной льдистости или развития опасных геологических процессов; в период эксплуатации на участках проведения ремонтно-восстановительных работ;

на участках оборудования стационарных постов мониторинга и др.

*Работа выполнена в рамках государственного задания по теме №122022400105-9 “Прогноз, моделирование и мониторинг эндогенных и экзогенных геологических процессов для снижения уровня их негативных последствий”.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бедрин Е.А.* Определение направлений по обеспечению устойчивости земляного полотна дорог в зоне вечной мерзлоты // Вестник СибАДИ. 2011. № 2. С. 15–21.
2. *Гребенец В.И., Исаков В.А.* Деформации автомобильных и железных дорог на участке Норильск–Талнах и методы борьбы с ними // Криосфера Земли. 2016. № 2. С. 69–77.
3. *Гулый С.А., Прелль Н.* Анализ источников причин некоторых криогенных явлений на Федеральной трассе Р-504 “Кольма” // Вестник МАДИ. 2013. № 3. С. 72–77.
4. *Кулаков В.С.* География Забайкальского края. Чита: Экспресс издательство, 2009. 224 с.
5. Официальный сайт Федерального дорожного агентства Министерства транспорта Российской Федерации. URL: <https://rosavtdor.gov.ru/> (дата обращения: 15.04.2024).
6. *Солнцев Н.А.* Учение о ландшафте. Избранные труды. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2001. 382 с.
7. Специализированные массивы для климатических исследований. URL: <http://aisori-m.meteo.ru/waisori/> (дата обращения: 07.04.2024).

## PECULIARITIES IN CHANGES OF GEOCRYOLOGICAL CONDITIONS ON THE SECTION OF THE FEDERAL HIGHWAY “AMUR” CHITA–Khabarovsk

A. N. Khimenkov<sup>a,#</sup>, A. P. Kulakov<sup>a,##</sup>, A. V. Romanov<sup>b</sup>, D. O. Sergeev<sup>a,###</sup>

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

<sup>b</sup>*FKU Uprдор “Zabaikalia”, ul. Anokhina 17, Chita, Zabaikalskii Krai, 672039 Russia*

<sup>#</sup>*E-mail: a\_khimenkov@mail.ru*

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

<sup>###</sup>*E-mail: cryo2@yandex.ru*

The paper considers the peculiarities of changes in geocryological conditions on the section “288 km” of the “Amur” highway Chita–Khabarovsk. A comprehensive analysis of cryogenic processes and deformations of the roadbed in the conditions of formation and functioning of a special natural-anthropogenic “highway” system has been carried out. A landscape-geocryological schematic map has been compiled with the boundaries of the natural- anthropogenic system and zones of influence outlined. Engineering geocryological profiles of the deformed section of the highway was built on the basis of seven drilled wells with a depth of 7.5 to 30 m. Thermometric observations were carried out in five wells with the study of the peculiarities of temperature distribution under and near the roadbed. Studies have shown that the causes of deformations of the roadbed are heterogeneous, multidirectional and uneven changes in geocryological conditions as a result of the spatiotemporal formation and development of interdependent natural and man-made processes in the natural-technical system. A number of organizational measures have been proposed to control changes in geocryological conditions and the development of the natural-anthropogenic “highway” system in local areas.

**Keywords:** *Amur highway, deformations of the roadbed, cryogenic processes, cryolithozone, permafrost, natural and anthropogenic system*

## REFERENCES

1. Bedrin, E.A. [Determination of directions for ensuring the stability of the roadbed in the permafrost zone]. *Vestnik SibADI*, 2011, no. 2, pp. 15–21. (in Russian)
2. Grebenets, V.I., Isakov, V.A. [Deformations of roads and railways on the Norilsk-Talnakh section and methods of controlling them]. *Kriosfera Zemli*, 2016, no. 2, pp. 69–77. (in Russian)
3. Gulyi, S.A., Prell, N. [Analysis of causes of some cryogenic phenomena on the Federal highway P-504 “Kolyma”]. *Vestnik MADI*, 2013, no. 3, pp. 72–77. (in Russian)
4. Kulakov, V.S. [Geography of the Trans-Baikal Territory]. Chita, Express Publ., 2009, 224 p. (in Russian)
5. The official website of the Federal Road Agency of the Ministry of Transport of the Russian Federation. URL: <https://rosavtodor.gov.ru/> (accessed: 15 April 2024). (in Russian)
6. Solntsev, N.A. [The doctrine of the landscape. Selected works]. Moscow, MSU Publ., 2001, 382 p. (in Russian)
7. Specialized arrays for climate research. URL: <http://aisori-m.meteo.ru/waisori/> (accessed: 07 April 2024). (in Russian)

УДК 528.873

## ВОЗМОЖНОСТЬ КОЛИЧЕСТВЕННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОПОЛЗНЕВЫХ ПРОЦЕССОВ ТЕРМОАБРАЗИОННЫХ БЕРЕГОВ В КРИОЛИТОЗОНЕ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА МОРФОЛОГИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ПО ОДНОКРАТНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СЪЕМКЕ

© 2024 г. А. С. Викторов<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН,  
Уланский пер. 13, стр. 2, Москва, 101000 Россия

\*E-mail: vic\_as@mail.ru

Поступила в редакцию 27.06.2024 г.

После доработки 02.07.2024 г.

Принята к публикации 20.07.2024 г.

Цель настоящего исследования – изучение возможности количественного определения динамических параметров оползневых процессов термоабразионных берегов в криолитозоне на основе анализа морфологической структуры этих берегов по материалам однократных космических съемок. Эмпирическое изучение проводилось на шести ключевых участках полуостровов Канин нос, Гыдан и Ямал. Из проведенного анализа следует, что вероятностное распределение размеров термоцирков, наблюдаемых в каждый момент, отличается от распределения размеров, образующихся молодых термоцирков (соответственно, оползней) за счет полного стирания термоцирка или его части в процессе развития берега. Результаты математического моделирования показали, что в условиях относительно однородного по геологическим и геокриологическим характеристикам абразионного склона устанавливается динамическое равновесие, проявляющееся в стабилизации средних размеров термоцирков и вероятностного распределения их размеров по простиранию склона. Наблюдаемые тенденции изменения средних размеров термоцирков на изученных ключевых участках (согласно эмпирическим данным) соответствуют выводу о существовании динамического равновесия в развитии морфологической структуры берегов. Получена аналитическая зависимость, дающая принципиальную возможность по наблюдаемой морфологической структуре термоабразионных берегов на снимке однократной космической съемки определить вероятностное распределение размеров формирующихся молодых оползней без стационарных наблюдений. Плотность генерации формирующихся оползней по морфологической структуре термоабразионных берегов не определяется. Результат исследования может быть использован при прогнозе отступления береговой линии и прогнозе оползневых процессов на термоабразионных берегах криолитозоны.

**Ключевые слова:** математическое моделирование, морфологические особенности оползней, термоабразионные берега, математическая морфология ландшафта, морфологические структуры, динамическое равновесие

DOI: 10.31857/S0869780924060041 EDN: AMBARC

### ВВЕДЕНИЕ

Обширная группа работ посвящена исследованию оползневых процессов в связи с отступанием берегов в зоне развития многолетнемерзлых пород [1, 9, 12, 13], а также ландшафтными факторами, влияющими на развитие процессов [2, 7, 10, 11], и их связи с климатическими характеристиками [14]. Для прогноза динамики берегов криолитозоны одним из наиболее важных моментов является определение динамических параметров развивающихся процессов, например, скорости отступления, размеров оползневых блоков, частоты генерации оползней во времени и вдоль береговой линии. Подобные

параметры определяются в большинстве исследований прямыми стационарными наблюдениями; для обеспечения достаточной точности определений это требует наблюдений значительной длительности. В силу этого представляет большой интерес поиск возможности определения значений параметров по однократным наблюдениям без длительных рядов. По сути, это представляет собой одну из задач индикации процессов [6], но в количественной области. Очевидно, такая задача имеет и фундаментальное значение, так как, по сути, относится к проблеме соотношения количественных параметров, характеризующих облик ландшафта, и параметров, характеризующих протекающие

в нем процессы. Цель исследования – изучение возможности количественного определения динамических параметров оползневых процессов термоабразионных берегов в криолитозоне на основе анализа морфологической структуры этих берегов по материалам однократных космических съемок.

### МЕТОДИКА

Ландшафт термоабразионных берегов с развитием оползневых процессов представляет собой комплекс термоцирков, включающих в себя оползневые тела разного возраста и поверхности с развитием разнообразных интенсивных процессов (термоабразионных, эрозионных, обвально-осыпных и термоденудационных). Характерной особенностью термоцирков является четкая граница с прилегающей водораздельной поверхностью, хорошо выделяемая на материалах космических съемок. Граница представляет собой обычно систему дуг, прилегающих друг к другу; подобный характер границы связан с тем, что формирование термоцирка начинается, как правило, с развития оползневого процесса. Нередко в пределах термоцирка также присутствуют дугообразные остаточные участки водораздельной поверхности, отвечающие различным стадиям оползания. Типичный вид термоабразионных берегов представлен на рис. 1.

В сфере изучения, как показывает анализ, находятся две основные характеристики:

- вероятностное распределение размеров формирующихся молодых оползней,
- плотность генерации формирующихся оползней, т.е. среднее число оползней, возникающих за единицу времени на единицу длины береговой линии.



**Рис. 1.** Типичное изображение термоабразионных берегов с развитием термоцирков в криолитозоне на материалах космической съемки.

Подход к решению поставленной задачи может базироваться на разработанной модели морфологической структуры термоабразионных берегов криолитозоны. Развитие подобных берегов происходит под действием комплекса процессов:

- появление на том или ином участке нового формирующегося термоцирка,
- стирание частей уже существующих термоцирков за счет наложения более молодых (“боковое стирание”) с сохранением общего числа термоцирков,
- увеличение числа термоцирков за счет формирования нового термоцирка внутри границ уже существующего с его разбиением на две части,
- уменьшение числа термоцирков за счет полного стирания термоцирков при наложении более молодых.

При таком развитии граница берегового склона и прилегающей водораздельной поверхности представляет собой сочетание дуг термоцирков. Часть дуг является новой, не затронутой последующими стираниями, а другая часть – остаточные, сохранившиеся после одно-, двух-, трех- и т.д. кратных частичных стираний существующих термоцирков новыми. Таким образом, в целом на материалах дистанционных съемок в случайный момент времени (съемка) наблюдается совокупность разновозрастных термоцирков, находящаяся в постоянном изменении.

Для решения поставленной задачи использована предложенная нами ранее модель формирования морфологической структуры прямолинейного длинного термоабразионного берега с однородными физико-географическими, геологическими и геокриологическими условиями, предполагается также относительное постоянство во времени климатических условий [4]. Модель основывается на следующих допущениях:

- вероятность формирования новых термоцирков (в количестве  $k = 1, 2, \dots$ ) за время  $\Delta u$  на отрезке береговой линии<sup>1</sup>  $\Delta l$  определяется только величинами временного интервала и отрезка

$$p_1(\Delta l, \Delta u) = \lambda \Delta l, \Delta u + o(\Delta l, \Delta u),$$

$$p_k(\Delta l, \Delta u) = o(\Delta l, \Delta u), k > 1,$$

где  $\lambda$  – параметр, отвечающий среднему числу термоцирков, формирующихся за единицу времени на единицу длины береговой линии;

- размеры возникающего термоцирка не зависят от места его появления на участке и имеют постоянное вероятностное распределение  $F_0(x)$ , не зависящее от времени<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> За положение термоцирка условно принято положение точки правой границы его хорды (начальная точка).

<sup>2</sup> Предполагаем, что распределение  $F_0(x)$  и другие распределения в работе имеют конечные среднее и дисперсию.

За размер термоцирка условно принималась длина хорды, замыкающей дугообразную границу термоцирка с прилегающей водораздельной поверхностью. Анализ позволил показать [4], что в этом случае появление новых термоцирков отвечает пуассоновскому случайному процессу, т.е. вероятность появления  $k$  термоцирков на длине  $l$  за время  $u$  дается выражением

$$P_{\mu}(k) = \frac{(\lambda ul)^k}{k!} e^{-\lambda ul}. \quad (1)$$

Методика включала следующие этапы:

- анализ математической модели изменения морфологического строения термоабразионных берегов криолитозоны для решения поставленной задачи,
- эмпирические исследования возникновения и размеров термоцирков в разных физико-географических условиях.

Эмпирические исследования проводились на ряде ключевых участков, расположенных в различных физико-географических и геокриологических условиях. Выбор участков выполнялся с соблюдением требований относительной морфологической однородности участка и однородности физико-географических, прежде всего, геолого-геоморфологических и геокриологических условий, в частности, прямолинейного простираения береговой линии. Морфологическая однородность анализировалась на базе

материалов космической съемки высокого разрешения и определялась на основании однотипности сочетаний элементов изображения, отражающей однотипность морфологического строения участка соответственно. Однородность геолого-геоморфологических условий анализировалась на базе материалов государственной геологической съемки масштаба 1 : 200 000 с использованием космических снимков.

В итоге было выбрано шесть участков (рис. 2). Участки сложены с поверхности отложениями разного генезиса (морскими, ледниковыми, озерно-ледниковыми, аллювиально-морскими и озерно-аллювиальными), представленными песками, алевритами, гравийно-галечными отложениями, супесями и суглинками с валунами и галькой, а также отложениями алевритово-мелко-тонкопесчаного состава; многолетнемерзлые породы имеют как прерывистое, так и массивно-островное и массивное распространение, более подробно характеристика участков приведена в работе [5].

На участки были получены материалы космической съемки высокого разрешения за два срока с интервалом 33–40 лет. Для анализа морфологических особенностей использованы космические снимки высокого разрешения со спутников WorldView 2 (разрешение 0.5 м/пикс), WorldView 3 (разрешение 0.3 м/пикс), GeoEye 1 (разрешение 0.5 м/пикс), Corona (разрешение 1.2 м/пикс) и ряда других.

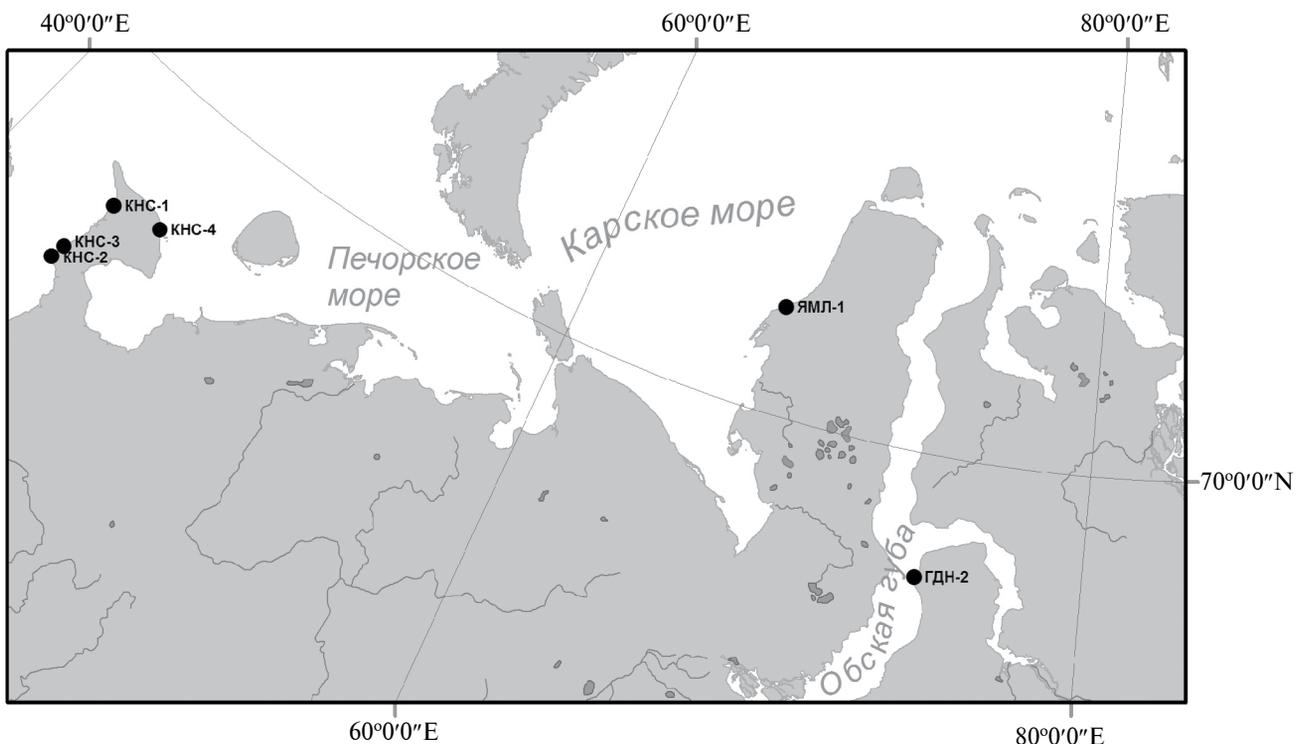


Рис. 2. Карта расположения ключевых участков.

На материалах космической съемки были от-дешифрованы бровки склонов, выделены ду-гообразные границы термоцирков, а также про-ведены хорды дуг, для каждого срока съемки было определено число термоцирков. Наконец, на последнем этапе определялся средний размер термоцирков для каждого участка и для каждого срока, и проводился анализ полученных данных. Измерение хорд проводилось с помощью средств геоинформационной системы ArcGIS.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Первой частью решения поставленной зада-чи стало выявление возможности определения количественных значений динамических пара-метров, характеризующих оползневой процесс, с помощью анализа количественных параметров морфологической структуры термоабразионного берега по материалам космической съемки. Про-веденный нами ранее анализ приведенной модели показал [3], что может быть решена задача оценки динамики распределения размеров термоцирков. Она решалась в ряд этапов:

– получение уравнения изменения вероятност-ного распределения размера термоцирка (длины хорды его дуги) во времени выполнялось на ос-нове рассмотрения различных пространственных соотношений формирующегося и существующих оползней

$$\frac{1}{\lambda} \frac{\partial F(x, u)}{\partial u} = \int_0^x y f(y, u) dy + 2x[1 - F(x, u)] + | + F_0(x)h(u) - 2F(x, u)h(u),$$

где  $F_0(x)$ ,  $F(x, u)$ ,  $f(x, u)$ ,  $h(u)$  распределение разме-ров формирующихся термоцирков, распределение и плотность распределения размеров термоцир-ков в момент  $u$ , средний размер термоцирка в мо-мент  $u$  соответственно, с условиями в начальный момент  $F(x, 0) = F_0(x)$  и  $F(0, u) = 0$ ,

– решение полученного уравнения,  
– оценка поведения полученного распределения при большом времени развития.

В итоге были получены следующие выводы [3]:

– существует предельное вероятностное распре-деление размеров термоцирков при большом вре-мени развития – стационарное распределение;

– получено соотношение предельного распре-деления термоцирков и распределения размеров формирующихся молодых термоцирков (соответ-ственно оползней):

$$F(x) = 1 - \frac{a[1 - F_0(x)]}{2[x + a]} - \frac{a - \int_0^x [1 - F_0(v)] dv}{2[x + a]^2}, \quad (2)$$

где  $a, F_0(x)$  – математическое ожидание (средний размер) и распределение размера формирующихся молодых термоцирков соответственно;

– получено описание изменения среднего размера термоцирков во времени и соотношение среднего предельного размера термоцирков ( $b$ ) и среднего размера формирующихся термоцирков (соответ-ственно оползней)

$$h(u) = \frac{a}{2 - e^{-\lambda au}}, \quad b = \frac{a}{2}, \quad (3)$$

где  $b$  – средний предельный размер термоцирков;

– плотность генерации термоцирков ( $\lambda$ ) не оказы-вает влияния на предельное распределение разме-ров, видимо, влияя только на скорость сходимос-ти к предельному распределению.

Таким образом, полученный результат позво-лил сделать вывод, что, хотя морфологическая структура термоабразионного берега находится в постоянном изменении, тем не менее при значи-тельном времени развития *распределение размеров* термоцирков становится стационарным, соответ-ственно постоянным становится и средний разме-р термоцирков, т.е. морфологическая структура достигает состояния динамического равновесия.

Исследование морфологического строения ключевых участков позволяют частично провер-ить полученные выводы и несколько детализи-ровать их. Анализ полученных результатов пока-зывает, что при повторном измерении среднего размера термоцирков в подавляющем большин-стве случаев должно наблюдаться его уменьшение, а на поздних этапах развития – практическая ста-билизация, конечно, исключая статистические флуктуации. Для экспериментальной проверки этого было исследовано изменение во времени среднего размера термоцирка по материалам по-вторных космических съемок. Результаты пред-ставлены в таблице (табл. 1).

Проведенный анализ данных позволяет заклю-чить, что средние размеры термоцирков находят-ся в интервале 0.027–0.144 км, при этом средние размеры термоцирка на исследованных участках п-ова Канин меньше, чем на любом из участков п-ова Ямал и Гыдан. Видимо, выявленные разли-чия следует объяснить разницей локальных физи-ко-географических, геолого-геоморфологических и геокриологических условий различных участков.

Анализ также показывает (табл. 2), что на трех ключевых участках из шести между сроками съемки средний размер термоцирков уменьша-ется на 0.6–4.8 м за 10 лет. На двух участках на-блюдается стабилизация размера и еще на одном – фиксируется формальное увеличение на 0.3 м за 10 лет, что также можно рассматривать с учетом статистических флуктуаций как практическую стабилизацию. То есть выявленные тенденции на-ходятся в согласии с полученными результатами

**Таблица 1.** Значения средних размеров термоцирков за два срока

Участок	Протяженность участка, км	Срок 1			Срок 2		
		Год съемки	Число термоцирков	Средний размер, км	Год съемки	Число термоцирков	Средний размер, км
КНС-1	10.4	1980	64	0.163	2020	72	0.144
КНС-2	11.8	1980	214	0.055	2013	290	0.041
КНС-3	5.4	1980	165	0.033	2013	176	0.031
КНС-4	11.9	1980	160	0.074	2017	159	0.075
ЯМЛ-1	2.9	1982	109	0.027	2019	108	0.027
ГДН-2	8.6	1979	298	0.029	2016	319	0.027

и подтверждают развиваемые представления о динамическом равновесии.

Таким образом на участках ЯМЛ-1 и ГДН-2 логично ожидать, что наблюдаемое распределение будет близко к предельному распределению размеров термоцирков. На этих участках было выполнено построение статистических распределений размеров термоцирков. Близкое к стационарному распределение размеров термоцирков представлено на рис. 3.

Возможные трудности анализа связаны с неоднозначностью выделения хорд малых размеров, в силу чего, по сути дела, мы имеем дело с усеченными распределениями. На эту неоднозначность и сложность косвенно указывают известные данные о зависимости числа выделяемых неровностей береговой линии от шага измерений, которые привели в свое время к возникновению представлений о фрактальности [8].

Используем сформулированные представления о динамическом равновесии термоабразионных берегов и полученное выражение (2) для решения

поставленной задачи. Дифференцируя его, получаем предельную плотность распределения размеров термоцирков:

$$\frac{dF(x)}{dx} = \frac{a}{2} \frac{dF_0(x)}{dx} \frac{1}{[x+a]} + a \frac{1-F_0(x)}{[x+a]^2} + a - \int_0^x [1-F_0(v)]dv + a \frac{0}{[x+a]^3} \tag{4}$$

Из выражения (2) следует равенство

$$a \frac{[1-F_0(x)]}{[x+a]} + a \frac{0}{[x+a]^2} = 2[1-F(x)] \tag{5}$$

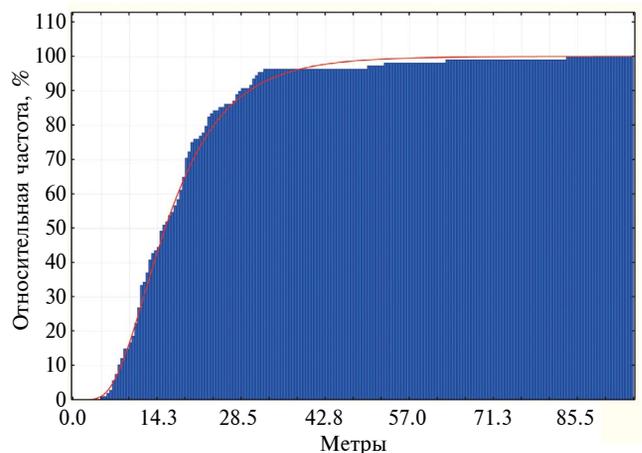
подставляя в (4) и выделяя плотность вероятности формирующихся оползней, получаем

$$\frac{dF_0(x)}{dx} = 2 \frac{dF(x)}{dx} \frac{[x+a]}{a} - 4 \frac{[1-F(x)]}{a} \tag{5}$$

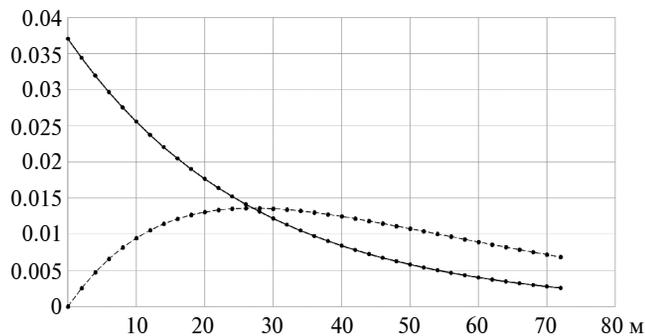
Наконец, интегрируя, используя (3) и упрощая, получаем выражение для вероятностного

**Таблица 2.** Скорость изменения средних размеров термоцирков

Участок	Интервал между съемками, лет	Скорость изменения среднего размера, м/10 лет
КНС-1	40	-4.8
КНС-2	33	-4.2
КНС-3	33	-0.6
КНС-4	37	0.3
ЯМЛ-1	37	0.0
ГДН-2	37	0.0



**Рис. 3.** Пример распределения размеров термоцирков на участке п-ва Ямал (синий контур — эмпирическое распределение, красная линия — логнормальное распределение).



**Рис. 4.** Примеры графиков наблюдаемой плотности распределения размеров термоцирков (сплошная) и плотности распределения размеров формирующихся молодых термоцирков (пунктирная) (пояснения в тексте).

распределения размеров формирующихся молодых термоцирков (соответственно оползней)

$$F_0(x) = 2F(x) - x \frac{[1 - F(x)]}{b} - \int_0^x \frac{[1 - F(u)]}{b} du.$$

Таким образом, получено выражение, дающее принципиальную возможность по наблюдаемой на снимке морфологической структуре с помощью анализа наблюдаемого распределения размеров термоцирков определить вероятностное распределение формирующихся молодых оползней.

Приведем пример использования данного решения. Пусть распределение наблюдаемых размеров термоцирков отвечает экспоненциальному закону с плотностью распределения

$$f(x) = \mu e^{-\mu x},$$

соответственно, со средним

$$M\xi = \frac{1}{\mu},$$

где  $\mu$  – параметр распределения.

Оценим распределение размеров формирующихся молодых термоцирков, необходимое для прогноза развития процессов на береговой линии. Подставляя в (5) и упрощая, получаем плотность распределения размеров формирующихся термоцирков

$$f_0(x) = \mu^2 x e^{-\mu x}.$$

Иначе говоря, в этом случае распределение размеров формирующихся молодых термоцирков отвечает гамма-распределению. Графики плотности распределения наблюдаемого распределения размеров и распределения размеров формирующихся молодых термоцирков приведены на рис. 4.

Трудности численной реализации обоснованного подхода могут быть связаны с выделением хорд малых размеров, в силу чего, по сути, как было отмечено выше, исследователь имеет дело с усеченными распределениями.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование позволяет сделать следующие выводы.

Морфологическая структура ландшафта термоабразионных берегов криолитозоны в однородных физико-географических условиях и при относительном постоянстве климатических условий находится в состоянии динамического равновесия.

Получено выражение, дающее принципиальную возможность по наблюдаемой на материалах однократной космической съемки морфологической структуре термоабразионных берегов определить без стационарных наблюдений вероятностное распределение размеров формирующихся молодых термоцирков (соответственно, оползней).

Плотность генерации формирующихся термоцирков (соответственно, оползней) не определяется по морфологической структуре термоабразионных берегов.

Результат исследования может быть использован при прогнозе отступления береговой линии и прогнозе оползневых процессов на термоабразионных берегах криолитозоны.

*Исследование выполнено в рамках госзадания по теме НИР № FMWM-2022-0010.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белова Н.Г., Шабанова Н.Н., Огородов С.А., Камалов А.М. и др. Динамика термоабразионных берегов Карского моря в районе мыса Харасавэй (Западный Ямал) // Криосфера Земли. 2017. Т. 21. № 6. С. 85–96.
2. Васильев А.А., Покровский С.И., Шур Ю.Л. Динамика термоабразионных берегов западного Ямала // Криосфера Земли. 2001. С. 44–52.
3. Викторов А.С. Исследование закономерностей динамики морфологической структуры абразионных берегов криолитозоны на основе комплексирования математического моделирования и космической съемки // Исследование Земли из космоса. 2024. (в печати)
4. Викторов А.С. Моделирование морфологических особенностей берегов с развитием оползневых процессов // Геоэкология. 2022. № 6. С. 28–36.
5. Викторов А.С., Орлов Т.В., Архипова М.В., Капранова В.Н., Бондарь В.В. Количественные закономерности морфологического строения абразионных берегов с развитием оползневых процессов в пределах криолитозоны (на примере побережья полуостровов Канин нос и Ямал) // Геоморфология. 2023. Т. 54. № 3. С. 124–137.

6. Викторов С.В., Илюшина М.Т., Кузьмина И.В. Эколого-генетические ряды растительных сообществ как индикаторы природных процессов // Экология. 1970. № 6. С. 88–94.
7. Кизяков А.И. Динамика термоденудационных процессов на побережье Югорского полуострова // Криосфера Земли. 2005. Т. IX. № 1. С. 63–67.
8. Мандельброт Б. Фрактальная геометрия природы. М.: Институт компьютерных исследований, 2002. 656 с.
9. Новиков В.Н., Федорова Е.В. Разрушение берегов в юго-восточной части Баренцева моря // Вестник Московского университета. Сер. 5: география. 1989. № 1. С. 64–68.
10. Совершаев В.А. Криогенные процессы и явления на побережье и шельфе арктических морей // Динамика арктических побережий России. М.: Изд-во МГУ, 1998. С. 12–18.
11. Хомутов А.В., Лейбман М.О. Ландшафтные факторы изменения скорости термоденудации на побережье Югорского полуострова // Криосфера Земли. 2008. Т. XII. № 4. С. 24–35.
12. Aleksyutina D.M., Shabanova N.N., Kokin O.V. et al. Monitoring and modelling issues of the thermoabrasive coastal dynamics // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2018. № 193. No. 012003.
13. Belova N.G., Novikova A.V., Günther F., Shabanova N.N. Spatiotemporal variability of coastal retreat rates at Western Yamal Peninsula, Russia, based on remotely sensed data // J. of Coastal Research. 2020. № 95. P. 367–371.
14. Leibman M., Kizyakov A., Zhdanova Y. et al. Coastal Retreat Due to Thermodenudation on the Yugorsky Peninsula, Russia during the Last Decade, Update since 2001–2010 // Remote Sensing. 2021. 13. 4042. P. 21. <https://doi.org/10.3390/rs13204042>

## POSSIBILITY OF QUANTITATIVE DETERMINATION OF DYNAMIC PARAMETERS OF LANDSLIDE PROCESSES FOR THERMOABRASION SHORES IN CRYOLITHOZONE BASED ON MORPHOLOGICAL PATTERN ANALYSIS BY SINGLE SPACE IMAGERY

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

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

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

The purpose of this study is to investigate the possibility of quantifying the dynamic parameters of landslide processes of abrasion shores in the cryolithozone by analyzing the morphological pattern of these shores taken from a single space survey. The empirical study was carried out at six key sites within the Kanin Nose, Gydan, and Yamal peninsulas. As follows from the analysis, the probability distribution of the thermocircus sizes observed at each moment differs from that of young thermocircuses (and, respectively, landslides) formed due to the erasure of a part of a thermocircus or its complete erasure in the process of the coastal development. The results of the mathematical modeling show that in the case of an abrasion slope with relatively homogeneous geological and geocryological characteristics, a dynamic balance is achieved, which is manifested in the stabilization of the average size of thermocircuses and stabilization of the probability distribution of their sizes along the slope extension. The analysis of empirical data at the studied key sites showed that the observed trends in the average size of the thermocircuses correspond to the conclusion about the existence of the dynamic balance in the development of the coastal morphologic pattern. The study's main result is the analytical dependence, which gives a principal possibility to determine the probability distribution of the sizes of young landslides based on the morphological pattern of abrasion shores observed from the single space survey without stationary observations. The morphological pattern of abrasion shores does not determine the generation density of forming landslides. The result of the study can be used in forecasting shoreline retreat and predicting landslide processes on abrasion shores of the cryolithozone.

**Keywords:** *mathematical modeling of morphological features of landslides, abrasion shores, mathematical morphology of landscapes, dynamic balance of morphological patterns*

### REFERENCES

1. Belova, N.G., Shabanova, N.N., Ogorodov, S.A., Kamalov, A.M. et.al. [Dynamics of thermal abrasion coasts of the Kara Sea in the area of Cape Kharasavey (Western Yamal)]. *Kriosfera Zemli*, 2017, vol. 21, no. 6, pp. 85–96. (in Russian)
2. Vasil'ev, A.A., Pokrovskii, S.I., Shur, Yu.L. [Dynamics of thermal abrasion shores of the western Yamal]. *Kriosfera Zemli*, 2001, vol. V, no. 1, pp. 44–52. (in Russian)
3. Victorov, A.S. [Research of regularities of morphological pattern dynamics for abrasion shores of cryolithozone on the basis of complexing mathematical modeling and space imagery]. *Issledovaniye Zemli iz kosmosa*, 2024, no. pp. (in Russian)
4. Victorov, A.S. [Modeling morphological features of abrasion landslide coasts in the cryolithozone]. *Geoekologiya*, 2022, no. 6, pp. 28–36. (in Russian)
5. Victorov, A.S., Orlov, T.V., Arkhipova, M.V., Kapralova, V.N., Bondar, V.V. [Quantitative laws of a morphological pattern for abrasion slopes with a landslide process within the cryolithozone (by the example of the Kanin and Yamal Peninsula coasts)]. *Geomorfologiya*

- i paleogeografiya*, 2023, vol. 54, no. 3, pp. 124–137. (in Russian)
6. Viktorov, S.V., Ilyushina, M.T., Kuz'mina, I.V. [Ecological and genetic series of plant communities as indicators of natural processes]. *Ekologiya*, 1970, no. 6, pp. 88–94. (in Russian)
  7. Kizyakov, A.I. [The dynamics of thermodenudation processes at the Yugorsky Peninsula coast]. *Kriosfera Zemli*, 2005, vol. IX, no. 1, pp. 63–67. (in Russian)
  8. Mandel'brot, B. [Fractal geometry of nature]. Moscow, Institute of Computer Research Publ., 2002, 656 p. (in Russian)
  9. Novikov, V.N., Fedorova, Ye.V. [Coastal destruction in the southeastern part of the Barents Sea]. *Vestnik Moskovskogo universiteta, Ser. 5: geografiya*, 1989, no. 1, pp. 64–68. (in Russian)
  10. Sovershayev, V.A. [Dynamics of the Arctic coasts of Russia]. Moscow, MGU Publ., 1998, pp. 12–18. (in Russian)
  11. Khomutov, A.V., Leibman, M.O. [Landscape controls of thermodenudation rate change on Yugorsky Peninsula coast]. *Kriosfera Zemli*, 2008, vol. XII, no. 4, pp. 24–35. (in Russian)
  12. Aleksyutina, D.M., Shabanova, N.N., Kokin, O.V., Ver gun, A.P. et al. Monitoring and modeling issues of the thermoabrasive coastal dynamics. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2018, no. 193, paper 012003. .
  13. Belova, N.G., Novikova, A.V., Günther, F., Shabanova, N.N. Spatiotemporal variability of coastal retreat rates at Western Yamal Peninsula, Russia, based on remotely sensed data. *J. of Coastal Research*, 2020, no. 95, pp. 367–371.
  14. Leibman, M., Kizyakov, A., Zhdanova, Y. et al. Coastal retreat due to thermodenudation on the Yugorsky Peninsula, Russia during the last decade, update since 2001–2010. *Remote Sensing*, 2021, 13:4042, pp. 21. <https://doi.org/10.3390/rs13204042>

## МОДЕЛИ В ИНЖЕНЕРНОЙ ГЕОЛОГИИ И ГИДРОГЕОЛОГИИ

УДК 622.7.017

## ГЕОФИЛЬТРАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЛЯ ОБОСНОВАНИЯ БЕЗОПАСНОЙ ОТРАБОТКИ ЯКОВЛЕВСКОГО ЖЕЛЕЗОРУДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ КМА

© 2024 г. П. А. Рыбников<sup>1,\*</sup>, Л. С. Рыбникова<sup>1,\*\*</sup><sup>1</sup>Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук,  
ул. Мамина-Сибиряка 58, Екатеринбург, 620075 Россия

\*E-mail: ribnikoff@yandex.ru

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

Поступила в редакцию 12.05.2024 г.

После доработки 09.08.2024 г.

Принята к публикации 29.09.2024 г.

Уникальное по запасам Яковлевское железорудное месторождение Курской магнитной аномалии приурочено к полосе длиной 40 км, шириной в среднем 440 м, мощность рудных пластов варьирует от 50 до 465 м. Богатые железные руды приурочены к кристаллическому фундаменту и залегают на глубине 470–550 м с углом падения 60°–70°. Промышленная добыча начата в 2005 г. Яковлевским подземным рудником системой с закладкой выработанного пространства. Отработка ведется в очень сложных гидрогеологических условиях: в кровле продуктивного горизонта находится высоконапорная многопластовая система Днепровско-Донецкого артезианского бассейна. Непосредственно на породах фундамента залегают нижнекаменноугольный водоносный горизонт (в естественных условиях с напором до 440 м), надежный выдержанный водоупор отсутствует: разделяющая слабопроницаемая толща представлена глинистыми отложениями (мощностью от 0.2 до 30 м) и плотными карбонатизированными образованиями в кровле руднокристаллической толщи (мощностью от 0 до 60 м). Осушение разрабатываемого участка месторождения осуществляется подземным способом путем дренирования только рудного тела с использованием горизонтальных и наклонно-восстающих скважин. Отработка месторождения уже привела к существенному снижению уровней подземных вод, изменению фильтрационных параметров разделяющей защитной толщи. Возможность расширения фронта добычных работ как по площади, так и по глубине требует серьезного гидрогеологического обоснования. Дальнейшее освоение Яковлевского месторождения может осуществляться путем увеличения глубины отработки (до горизонта –525 м) или выемкой предварительного целика в интервале от –300 до –370 м. Реализация этих вариантов потребует предварительного осушения нижнекаменноугольного водоносного горизонта, расход такого водопонижения составит около 3 тыс м<sup>3</sup>/ч, и приведет к формированию обширной депрессионной воронки.

**Ключевые слова:** гидрогеологические условия, водоотлив, фильтрационная неоднородность, планово-пространственная модель, напорные воды, каменноугольный водоносный горизонт, богатые железные руды, водозащитная толща, зоны водопроводящих трещин, изменение фильтрационных свойств

DOI: 10.31857/S0869780924060054 EDN: ALVZNW

## ВВЕДЕНИЕ

Яковлевское месторождение богатых железных руд Курской магнитной аномалии открыто в 1953 г. при проведении поисковых работ по оценке угленосности ниже-каменноугольных отложений (рис. 1) [4, 5]. По запасам руд (9 млрд т руды с содержанием железа до 68%) и их качеству месторождение является уникальным среди открытых и эксплуатируемых в настоящее время железорудных месторождений всего мира, а по своим гидрогеологическим и горнотехническим условиям разработки – одним из наиболее сложных [32].

Вскрытие Яковлевского месторождения осуществлено в 1980 г. тремя стволами в лежащем боку

залежи вне зоны сдвижения на расстоянии 1.1 км от рудного тела. Для проходки стволов был применен способ искусственного замораживания пород, формирование ледопородных цилиндров осуществлялось с помощью 66 скважин глубиной 620 м [28]. Первая руда была поднята в 1997 г., промышленная добыча началась в 2005 г. (см. рис. 1). Реализация проекта первой очереди позволила достичь производственной мощности в 1 млн т/год.

Кроме выработок, пройденных с поверхности, шахтное поле вскрыто горными выработками вентиляционно-закладочного (–370 м) и откаточного горизонтов (–425 м). Способ отработки рудного тела подземный [26].

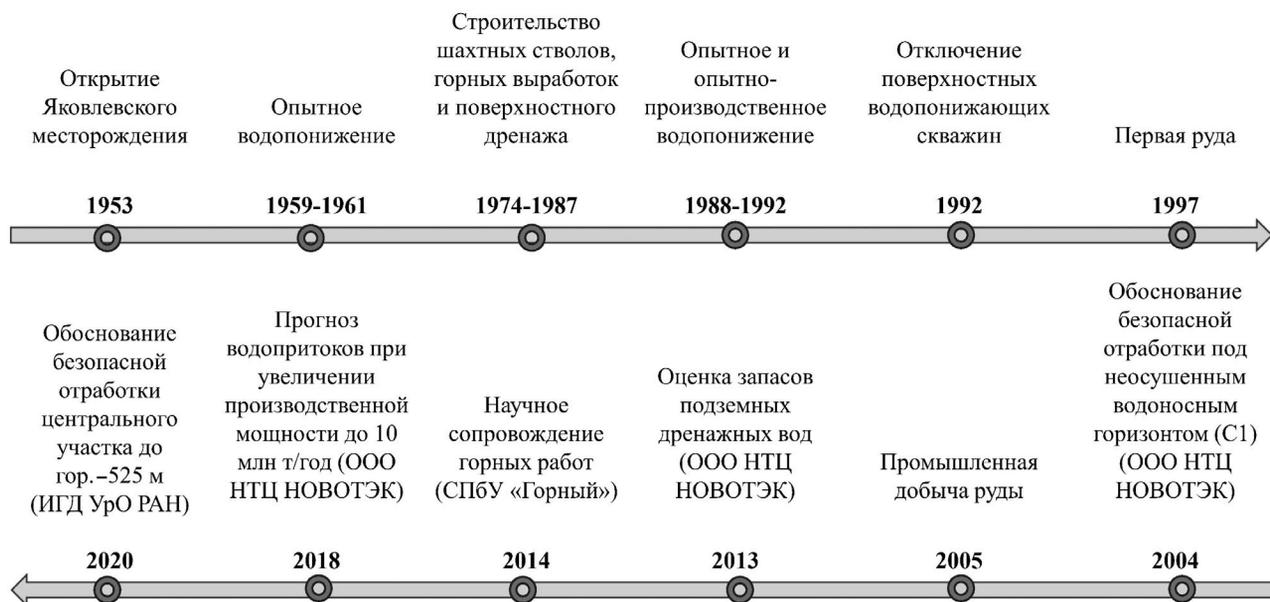


Рис. 1. Основные этапы развития горнодобывающих и научно-исследовательских работ на Яковлевском месторождении.

В 1986 г. Институтом “ВИОГЕМ” был разработан проект осушения 1-й очереди Яковлевского рудника, в котором для обеспечения безопасной добычи предусматривалось предварительное снижение напоров в нижнекаменноугольном водоносном горизонте дренажной системой из 30 скважин, пробуренных с поверхности. Предполагалось, что при водоотборе 2500 м<sup>3</sup>/ч произойдет снижение уровня до отметки –230 м, т.е. полного осушения нижнекаменноугольного горизонта не произойдет. Осушение его и собственно рудной залежи должно было осуществляться восстающими скважинами, закладываемыми в виде дренажных узлов из горных выработок горизонта –425 м.

В 1988–1992 гг. на месторождении проводились масштабные опытные работы (опытное и опытно-производственное понижение), 10.02.1992 г. были отключены скважины, дренирующие нижнекаменноугольный водоносный горизонт. На основании интерпретации результатов опытных работ был сделан вывод о низкой проницаемости пород разделяющего слоя между нижнекаменноугольным и рудным водоносным горизонтом. Это позволило обосновать решение об отключении поверхностной системы водопонижения. Возможность безопасной отработки Яковлевского железорудного месторождения под неосушенным нижнекаменноугольным водоносным горизонтом рассматривается во многих работах [3, 7, 24, 31].

В настоящее время осушение разрабатываемого участка месторождения осуществляется подземным способом путем дренирования только рудного тела. Дренажные узлы включают в себя горизонтальные и наклонно-восстающие скважины.

Осушение высоконапорных водоносных горизонтов (с напором до 440 м), расположенных над рудной залежью, не осуществляется. Длина шахтного поля 1.6 км, выемочный этаж ограничен условно отметками кровли –370 м, подошвы –425 м. Породы в интервале от –300 до –370 м являются предохранительным целиком.

Для предотвращения образования зоны водопроводящих трещин, связывающих выработки рудника с нижнекаменноугольным водоносным горизонтом, отработка запасов месторождения ведется системой с полной закладкой выработанного пространства твердеющими смесями. Предполагается, что при таком способе добычи не будут образовываться зона беспорядочного обрушения, разломы и крупные трещины. Деформация массива будет происходить без разрыва сплошности пород с формированием зоны плавных сдвижений [7, 29].

Высота зоны водопроводящих трещин над выработанным пространством на пластовых месторождениях зависит от мощности вынужденного пласта, в данном случае от неполной закладки выработанного пространства. По результатам натурных наблюдений зафиксировано оседание подошвы предохранительного целика на 2 м, на поверхности земли сформировалась мульда глубиной 1.1 м [9].

Проблемы отработки Яковлевского месторождения обсуждаются во многих публикациях [10–13, 17–20, 22, 23, 33, 35]. Журнал “Записки горного института” в 2006 г. (том 168) посвящен особенностям освоения Яковлевского месторождения, в нем было опубликовано 23 научных статьи, посвященных широкому спектру задач, возникающих при отработке месторождения. Стратегия развития

Яковлевского горно-обогатительного комбината (ПАО “Северсталь”) предусматривает увеличение объемов добычи руды до 5 млн т/год [32].

Целями настоящей работы являются гидрогеологическое обоснование возможности безопасной отработки месторождения при расширении фронта добычных работ как по площади, так и по глубине; прогноз изменения балансовых составляющих, формирующих притоки подземных вод в сложной гидродинамической системе взаимодействующих высоконапорных и водообильных горизонтов.

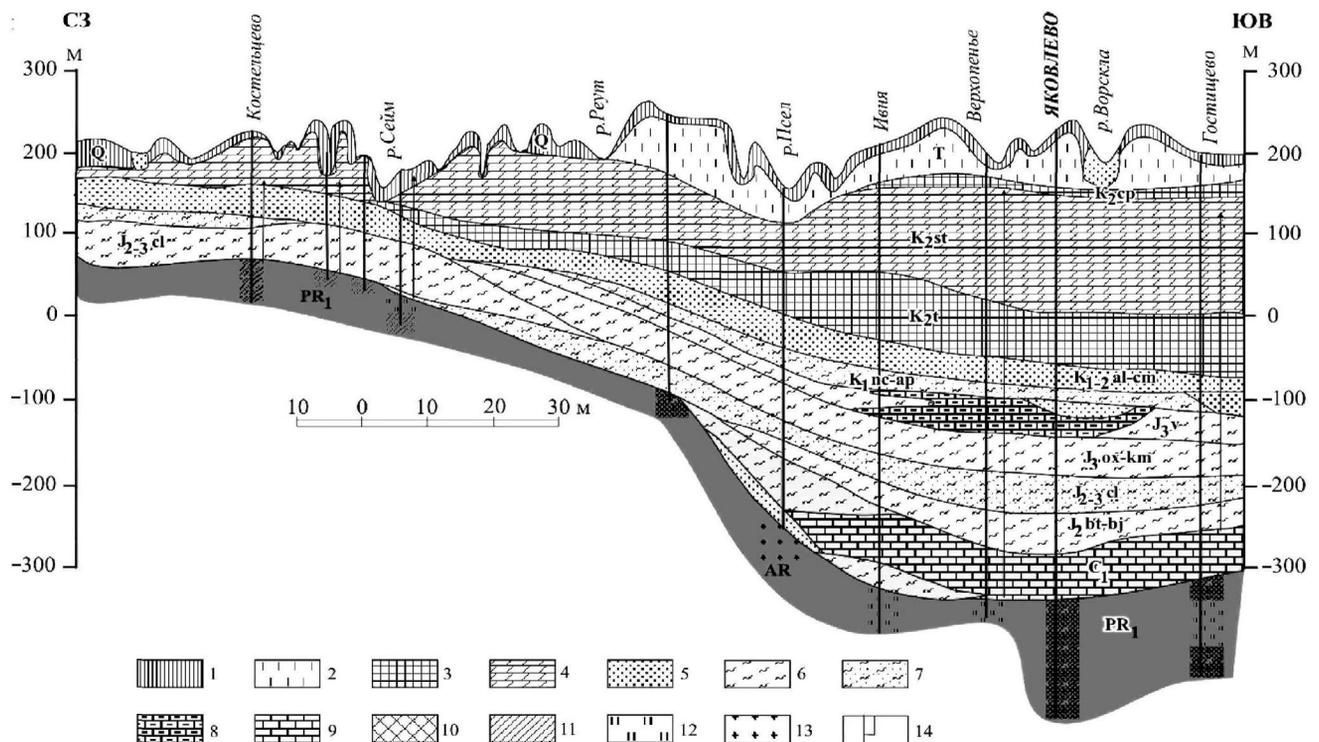
### ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ

Яковлевское месторождение расположено в Белгородской обл. в 40 км к северо-западу от г. Белгород. В геоморфологическом отношении месторождение относится к южному склону Средне-Русской возвышенности. По рельефу это возвышенная равнина, понижающаяся на ЮЗ к осевой части Днепровско-Донецкой впадины, расчлененная речной и овражно-балочной сетью. В центральной части участка протекает р. Ворскла (левый приток Днепра), отметки дневной поверхности водораздельных участков изменяются от 220 до 250 м, в долине Ворсклы понижаются до 180 м [27].

Климат района умеренно-континентальный. Среднее многолетнее количество атмосферных осадков составляет 585–615 мм, из которых порядка 470–530 мм расходуется на испарение. Высота снежного покрова не превышает 20–30 см. Среднемноголетняя глубина промерзания почвы составляет 60–70 см, максимальная величина промерзания 100 см.

Рассматриваемая площадь входит в состав Украинской синеклизы, северное крыло которой наложено на сводовую часть Воронежской антеклизы. Согласно схеме гидрогеологического районирования, район находится в пределах Днепровско-Донецкого артезианского бассейна (структура II порядка), который входит в состав Восточно-Европейского сложного артезианского бассейна (структура I порядка) [30]. Породы палеозоя имеют здесь достаточно крутое и глубокое залегание (рис. 2).

Месторождение представляет собой синклиналию складку протяженностью 70 км и шириной от 0.8–2.0 км в северной части месторождения до 4.5 км на южном фланге. К западному крылу складки приурочена Яковлевская полоса железистых кварцитов. Падение пород, слагающих месторождение, северо-восточное, угол падения 60°–70°, СЗ простираение при азимуте 320°.



**Рис. 2.** Гидрогеологический разрез Днепровско-Донецкого артезианского бассейна [31]. 1 – суглинки; 2 – переслаивание песков и глин; 3 – мел; 4 – мергель; 5 – глины; 6 – песчаные глины; 8 – песчаники; 9 – известняки; 10 руды; 11 – кварциты; 12 – кристаллические сланцы; 13 – граниты; 14 – пьезометрический уровень водоносных горизонтов.

Месторождение приурочено к породам кристаллического фундамента, перекрытого толщей осадочных пород мощностью 550–600 м (рис. 3). Богатые железные руды (БЖР) являются корой выветривания железистых кварцитов, они образуют непрерывные плащеобразные залежи изменчивой формы шириной от 200 до 600 м. Вертикальная мощность изменяется от 20 м у лежачего бока до 400 м у висячего бока рудной залежи. Основные рудные минералы месторождения: мартит, железная слюдка, гематит, гидрогематит и сидерит; нерудные минералы представлены кварцем, хлоритом, кальцитом.

Главная особенность геологического строения Яковлевского месторождения — сложные гидрогеологические условия, характеризующиеся наличием в разрезе девяти водоносных горизонтов. Они разделены на два слабо связанных водоносных комплекса региональным водоупором, толщей киммеридж-оксфордских глин мощностью 35–65 м. Верхний комплекс объединяет аллювиальный, харьковский, каневско-бучакский, турон-маастрихтский, альб-сеноманский, неом-аптский горизонты. Нижний комплекс состоит из юрского (келловейского), каменноугольного и руднокристаллического горизонтов.

Водоносные горизонты верхней части осадочной толщи характеризуются безнапорным или слабонапорным режимом, сезонными колебаниями уровней подземных вод. В породах нижней части осадочной толщи распространена система напорных водоносных горизонтов с напорами до 480 м в каменноугольном водоносном горизонте. Непосредственное питание атмосферными осадками на площади района имеют водоносные горизонты, залегающие выше сантон-кампанского водоупора. Область питания остальных водоносных горизонтов находится севернее Белгородского железорудного района, в сводовой части Воронежской антеклизы.

Юрский (келловейский) водоносный горизонт ( $J_2k$ ) приурочен к толще песков мощностью 25–55 м с прослоями песчаников, реже глин. Коэффициент фильтрации варьирует в пределах 0.3–2.2 м/сут. Водопроницаемость пород изменяется от 10 до 40 м<sup>2</sup>/сут, коэффициент пьезопроводности составляет  $(1.5–3.2) \cdot 10^5$  м<sup>2</sup>/сут. От нижележащего нижекаменноугольного водоносного горизонта он отделен пластом водоупорных бат-байосских глин мощностью 30–50 м. На отдельных участках мощность глин уменьшается до 10 м, где осуществляется гидравлическая связь келловейского водоносного горизонта с каменноугольным.

Нижнекаменноугольный водоносный горизонт ( $C_1$ ) развит повсеместно и приурочен к толще известняков, переслаивающихся, особенно в нижней части толщи, с углистыми глинами. Мощность водоносного горизонта составляет 20–80 м.

Коэффициент фильтрации изменяется в широком диапазоне от 0.01 до 12.5 м/сут, причем наиболее низкие значения отмечаются над сланцами лежачего бока (на юго-запад от рудной полосы). Коэффициент пьезопроводности изменяется от  $1 \cdot 10^4$  до  $5 \cdot 10^5$  м<sup>2</sup>/сут. Горизонт высоконапорный, в естественных условиях напоры над кровлей известняков достигали 380–480 м, пьезометрические уровни воды устанавливались на абсолютных отметках 146–148 м.

Руднокристаллический водоносный горизонт (AR-PR) приурочен к рудам, железистым кварцитам, сланцам лежачего и висячего боков. Условия фильтрации подземных вод определяются степенью трещиноватости и тектонической нарушенности пород. Наиболее проницаемыми являются рыхлые разности богатых железных руд ( $k = 0.04 \div 0.28$  м/сут); сланцы и кварциты характеризуются слабой водообильностью ( $k \sim 0.01$  м/сут). Водопроницаемость руднокристаллического горизонта изменяется от 2 (сланцы, граниты) до 50 м<sup>2</sup>/сут (богатые руды). Водоносный горизонт напорный. В естественных условиях напоры над кровлей водоносного горизонта достигали 405–510 м, пьезометрические уровни воды устанавливались на абсолютных отметках 149–151 м.

Формирование водопритоков в подземные горные выработки Яковлевского рудника определяется обводненностью руднокристаллического водоносного горизонта и вышележащего нижекаменноугольного водоносного горизонта. Нижнекаменноугольный водоносный горизонт гидравлически связан с руднокристаллическим через толщу глинистых отложений в подошве нижекаменноугольного горизонта (мощностью от 0.2 до 30 м) и плотных переотложенных руд, карбонатизированных бокситовых образований в кровле руднокристаллической толщи (мощностью от 0 до 60 м).

Под влиянием осушительных мероприятий на Яковлевском месторождении в нижекаменноугольном и руднокристаллическом водоносных горизонтах сформировались обширные воронки депрессии с радиусом влияния в десятки километров. Уровень нижекаменноугольного водоносного горизонта в центре депрессионной воронки расположен на абсолютных отметках  $29 \div 50$  м. Режим фильтрации в руднокристаллическом водоносном горизонте следует считать напорным, поскольку пьезометрические уровни горизонта (–350 м), зафиксированные по скважинам, минимум на 20 м превышают отметки потолочины (–370 м).

Среднегодовой суммарный водоприток к водоотливному комплексу за последние годы составил 505 м<sup>3</sup>/ч, варьируя от 451 до 542 м<sup>3</sup>/ч.

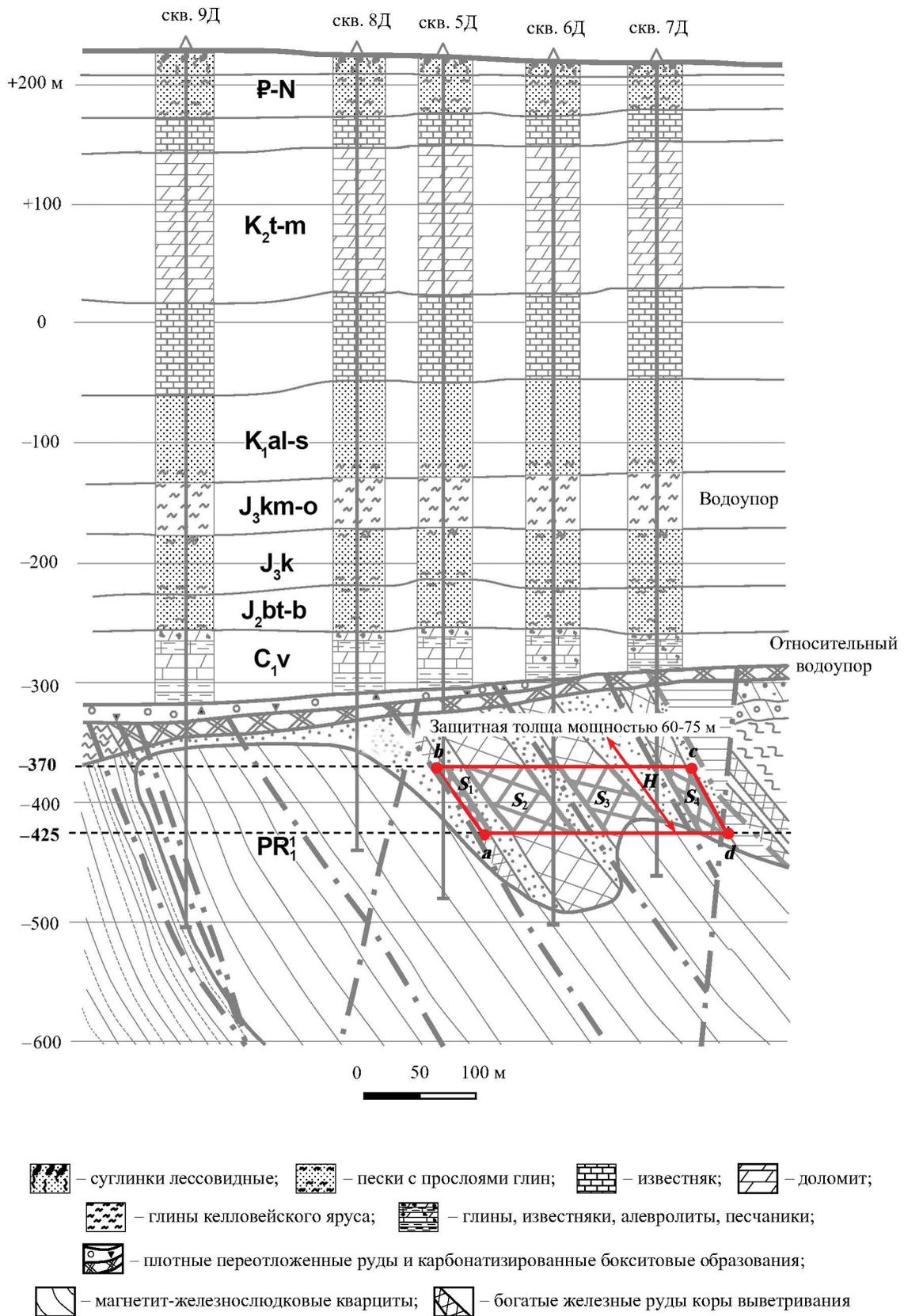


Рис. 3. Геологический разрез по линии 29 [9].  $a, b, c, d$  – контур отработки между горизонтом  $-370$  м и горизонтом  $-425$  м;  $S_1, S_2, S_3, S_4$  – контуры богатых железных руд.

## МЕТОДИКА РАБОТ

Гидродинамическая модель Яковлевского месторождения базируется на результатах работ, выполненных ООО НТЦ “НОВОТЭК” в предыдущие годы [2]. Авторами представленной работы было увеличено количество пластов модели, введена равномерная разбивка, уточнены геофильтрационные параметры, изменена глубина заложения дрен и их положение, прогнозные задачи решались в нестационарной постановке [36].

Геофильтрационная модель представляет собой 5-пластовую планово-пространственную модель фильтрации подземных вод. Рассматриваются следующие водоносные горизонты, взаимосвязанные через слабопроницаемые разделяющие слои: келловейский, нижнекаменноугольный, руднокристаллический (рис. 4). Предполагается, что в пределах целика ( $m_0 = 65$  м) возможно формирование зоны водопродвижающих трещин.

Фильтрационный поток моделировался равномерной прямоугольной сеткой с шагом 50 м, состоящей из  $390 \times 390 = 152100$  блоков, каждый из которых включает 5 слоев. Площадь модели составила 400 км<sup>2</sup>.

Северная граница распространения нижнекаменноугольных отложений проходит по юго-западному склону Воронежского массива примерно в 30–50 км от месторождения. Здесь начинается формироваться региональный поток, который

реализуется на модели границей III рода с отметками 144–151 м, что отражает положение уровней в естественных условиях. В Ю, ЮЗ и ЮВ направлениях глубина залегания кровли горизонта увеличивается, в пределах Днепровско-Донецкой впадины до 1000 м и более. Южная граница соответствует области разгрузки регионального потока и реализована на модели границей III рода с отметками 132–136 м через соответствующее фильтрационное сопротивление на расстоянии ( $\Delta L \sim 50$  км), которое позволяет учитывать расширение области фильтрации в процессе осушения водоносных горизонтов. Дополнительное фильтрационное сопротивление  $\Phi_d$  определялось по формуле [2]:

$$\Phi_d = \Delta L / BT,$$

где  $\Delta L$  – расстояние, на которое “удалена” граница области фильтрации, т.е. расстояние от границы области фильтрации до контура с известным напором (уровнем);  $B$  – средняя ширина ленты тока в пределах реализуемого участка “дополнительной” области фильтрации;  $T$  – средняя водопроницаемость пласта в пределах реализуемого участка. Коэффициент  $C$  (м<sup>2</sup>/сут на 1 м) определялся по зависимости [2]  $C = 1/\Phi_d B$  и составил 0.001 и 0.5 м<sup>2</sup>/сут на 1 м для северной и южной границы соответственно.

Граничные условия для руднокристаллического горизонта задавались по такой же схеме с отметками уровней 148–155 м на северной границе и 115–127 м на южной при значениях  $C = 0.01$  м<sup>2</sup>/сут на 1 м.

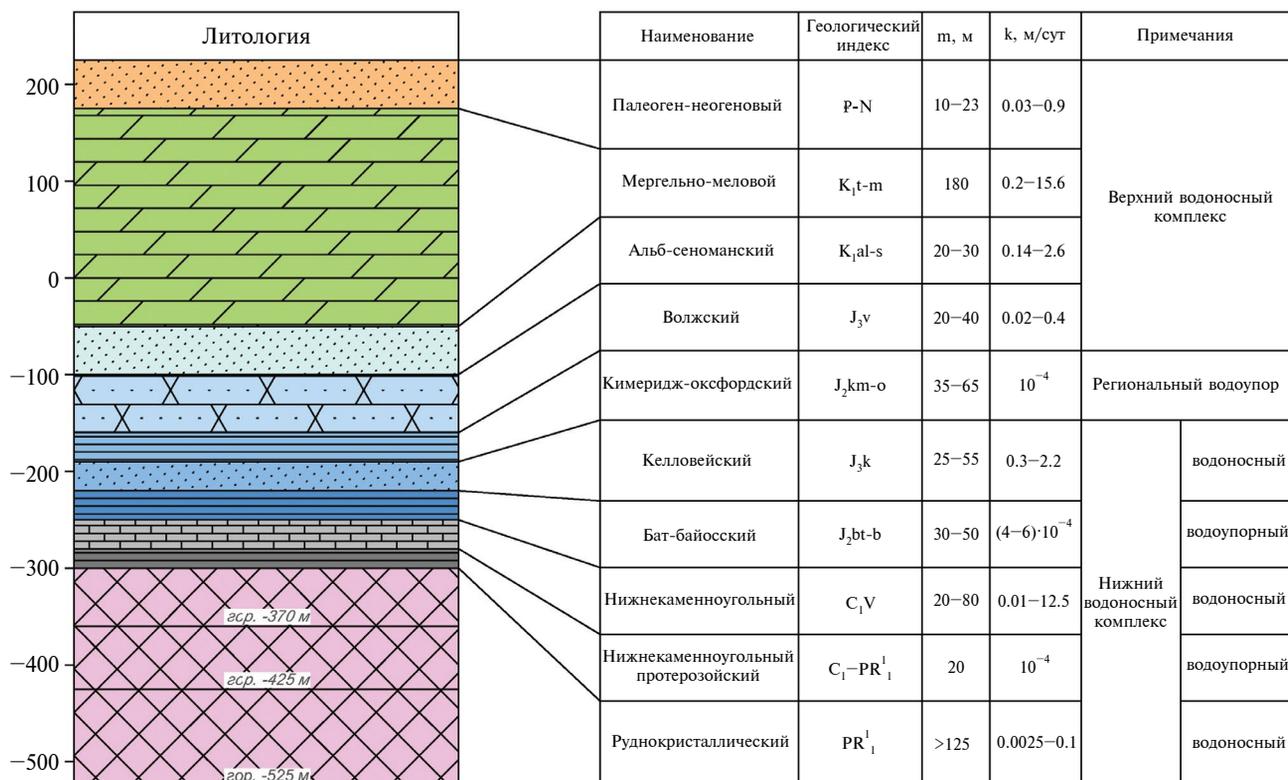


Рис. 4. Геофильтрационная схема участка обработки Яковлевского месторождения.

Горные выработки реализованы на модели посредством задания граничного условия III рода (дрена) с заданием уровня подземных вод, отвечающего отметке дрены, через дополнительное фильтрационное сопротивление, учитывающее замену горных выработок расчетным блоком. Величина кондактанса подбиралась при решении обратных задач при фиксированном положении отметки дна дрены, которое соответствует глубине отработки. Дренажные скважины задавались с помощью граничного условия II рода.

Параметры руднокристаллического горизонта, разделяющей слабопроницаемой толщи, а также параметры нижнекаменноугольного водоносного горизонта первоначально были приняты по результатам калибровки геофильтрационной модели при решении эпигнозных задач [2]. Коэффициент фильтрации нижнекаменноугольного водоносного горизонта изменяется от 0.15 до 10 м/сут. Наиболее проницаемыми являются известняки над железорудной полосой ( $k = 10$  м/сут); на северо-востоке (висячий блок)  $k = 0.25 \div 5$  м/сут, на юго-западе (лежащий блок)  $k = 0.1 \div 1.5$  м/сут. Коэффициент фильтрации пород железорудной полосы составляет 0.1 м/сут, сланцев  $k = 0.0008 \div 0.0025$  м/сут. Фоновые значения коэффициентов фильтрации слабопроницаемого слоя составляют  $(1 \div 7) \cdot 10^{-6}$  м/сут, над отработанной частью железорудной полосы по результатам калибровки модели в 2018 г. [2] значения коэффициента фильтрации были увеличены на 2 порядка до  $2.5 \cdot 10^{-4}$  м/сут.

По проницаемости слои моделировались кусочно-однородными. Мощность водоносных горизонтов и разделяющих толщ в каждом блоке рассчитывалась как разность между абсолютными отметками кровли и подошвы соответствующего пласта. Проводимость пласта в каждом расчетном блоке модели определялась исходя из распределения "полей" гидрогеологических параметров.

В основу решения обратной стационарной задачи положены современные фактические данные о напорах (уровнях) подземных вод нижнекаменноугольного и руднокристаллического водоносных горизонтов, водопритоках к дренажным устройствам и горным выработкам рудника. В процессе калибровки модели при решении обратной задачи уточнялись фильтрационные характеристики пластов в плане и разрезе. Было установлено, что коэффициент фильтрации разделяющей толщи над отработанным горизонтом увеличился до  $9 \cdot 10^{-4}$  м/сут (почти в 4 раза по сравнению с полученными на предыдущем этапе в работе [2]).

Соответствие модельных и фактических уровней нижнекаменноугольного горизонта имеет удовлетворительный характер, средневзвешенная ошибка составляет 1%; модельное значение водопритока к системе осушения отличается от фактического на 6%.

В настоящее время водоотлив рудника (горизонт  $-425$  м) формируется за счет притока из руднокристаллического водоносного горизонта и перетока из нижнекаменноугольного водоносного горизонта в руднокристаллический через слабопроницаемые породы, залегающие в кровле руднокристаллической водоносной толщи.

С использованием откорректированной гидрогеологической модели проведено прогнозное численное моделирование для трех вариантов развития рудника:

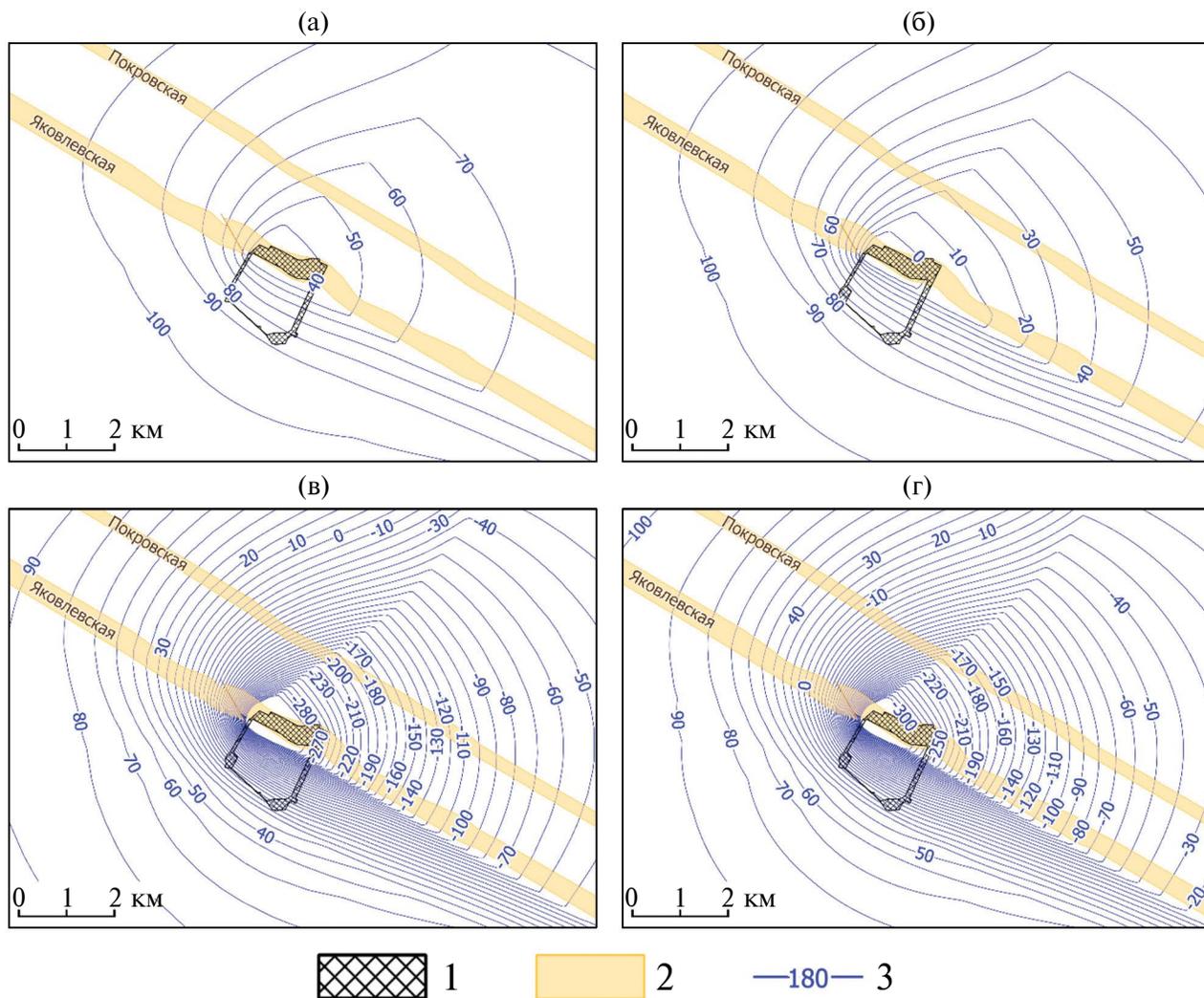
1. Отработка горизонта богатых железных руд в интервале  $-370 \div -425$  м в восточном и западном направлении на расстояние до 2.4 км.
2. Отработка горизонта богатых железных руд в интервале  $-425 \div -525$  м.
3. Отработка целика выше горизонта  $-370$  м в интервале  $-325 \div -370$  м, непосредственно под нижнекаменноугольным водоносным горизонтом.

Безопасная отработка центрального участка Яковлевского месторождения при расширении границ выемки до горизонта  $-525$  м (вариант № 2) и отработка запасов предохранительного целика (вариант № 3) возможны только при проведении предварительного осушения нижнекаменноугольного водоносного горизонта. Геомеханическими расчетами установлено, что при текущем уровне недозакладки выработанного пространства, после углубления отработки до горизонта  $-525$  м (вариант № 2), защитный целик будет в значительной степени разрушен, и может сформироваться зона водопроводящих каналов [16]. Такой сценарий предопределяет необходимость полного осушения нижнекаменноугольного горизонта.

В качестве исходного принималось положение уровней подземных вод, которое соответствует фактическому современному и реализовано на модели в процессе решения обратной задачи (рис. 5а).

Геофильтрационные параметры в руднокристаллическом водоносном горизонте на весь прогнозный период для участков отработки слоевой системой с полной закладкой (песчано-цементная смесь) выработанного пространства литой твердеющей смесью задавались без изменений. Опыт отработки месторождения показывает, что в процессе закладочных работ наблюдается недозаклад, достигающий десятки сантиметров, отмечается трещиноватость закладочного массива, при этом существенных изменений в водопритоках на участках заложенного и неотработанного массивов в настоящее время не отмечается.

При реализации сценария отработки по варианту № 1 над восточным участком было задано повышенное значение коэффициента фильтрации разделяющей толщи ( $9 \cdot 10^{-4}$  м/сут), которое характеризует увеличение взаимосвязи



**Рис. 5.** Распределение уровней подземных вод в нижнекаменноугольном водоносном горизонте (врезка на центральную часть): а – современное состояние; б – вариант № 1 (отработка в интервале  $-370 \div -425$  м); в – вариант № 2 (отработка в интервале  $-425 \div -525$  м); г – вариант № 3 (отработка целика). 1 – горные выработки, 2 – контур железорудной полосы, 3 – гидроизопезы.

руднокристаллического и нижнекаменноугольного горизонтов при отработке.

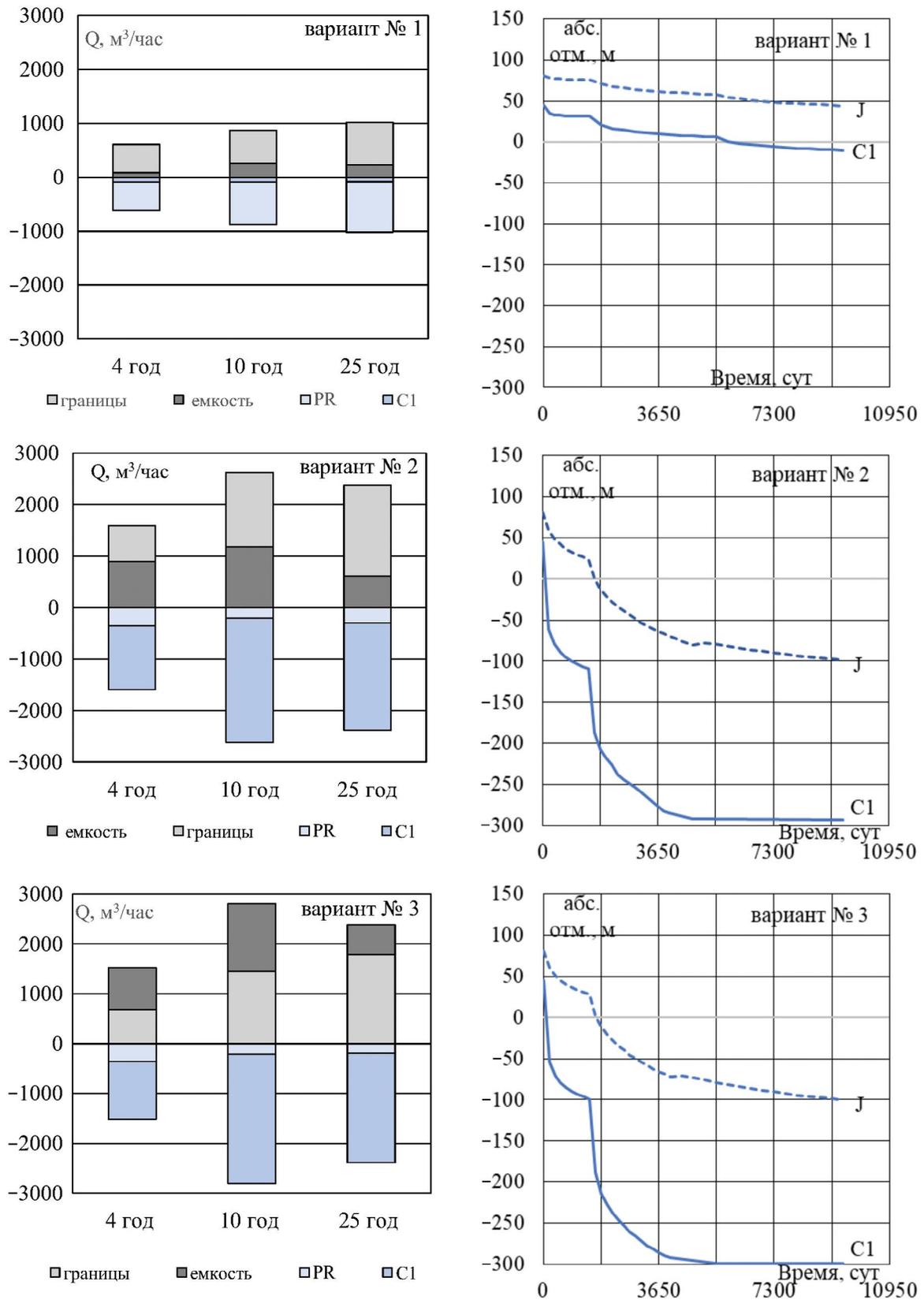
При реализации сценария отработки по варианту № 1 над восточным участком было задано повышенное значение коэффициента фильтрации разделяющей толщи ( $9 \cdot 10^{-4}$  м/сут), которое характеризует увеличение взаимосвязи руднокристаллического и нижнекаменноугольного горизонтов при отработке.

Задача осушения нижнекаменноугольного водоносного горизонта решалась в нестационарной постановке и была разбита на два этапа. На первом этапе целью было определение максимального водопритока, для чего в соответствующие блоки задавалось граничное условие III рода – дрена, с отметками подошвы нижнекаменноугольного водоносного горизонта. На втором этапе подбирался расход восстающих скважин (граничное условие II рода), обеспечивающий поэтапное

увеличение площади осушения и необходимое снижение уровня за заданное время.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

*Прогнозные оценки изменения гидрогеологических условий при развитии горных работ в интервале  $-370 \div -425$  м (вариант № 1).* Увеличение в 3 раза площади ведения горных работ приводит к расширению депрессионной воронки на юго-восток (см. рис. 5б), закономерному росту бокового притока непосредственно из руднокристаллического горизонта (до  $851 \text{ м}^3/\text{ч}$ ) и расходов перетекания из нижнекаменноугольного водоносного горизонта (до  $191 \text{ м}^3/\text{ч}$ ) (рис. 6). Суммарный водоприток к концу отработки увеличится в 2 раза и составит  $1042 \text{ м}^3/\text{ч}$ . На завершающем этапе отработки уровни подземных вод в руднокристаллическом водоносном



**Рис. 6.** Балансовые составляющие ( $Q$ , м<sup>3</sup>/ч, PR – водоприток из руднокристаллического горизонта; C1 – водоприток из нижнекаменноугольного горизонта с учетом перетекания из келловейского) и уровни подземных вод (абс. отг., м, C1 – нижнекаменноугольный горизонт, J – келловейский горизонт) при реализации сценариев отработки: вариант № 1, отработка в интервале  $-370 \div -425$  м; вариант № 2, отработка в интервале  $-425 \div -525$  м; вариант № 3, отработка целика.

горизонте в центре депрессии снизятся до отметки  $-425$  м; понижение уровня в нижнекаменноугольном горизонте составит  $35$  м, в келловейском  $37$  м (см. рис. 6).

*Прогнозные оценки изменения гидрогеологических условий при развитии горных работ в интервале  $-425 \div -525$  м (вариант № 2).* Увеличение глубины отработки приводит к закономерному росту расходов бокового притока непосредственно из руднокристаллического горизонта (до  $951 \text{ м}^3/\text{ч}$ ) с последующим снижением (до  $289 \text{ м}^3/\text{ч}$ ) в результате осушения нижнекаменноугольного горизонта. Возможность отработки горизонта  $-525$  м определяется эффективностью водопонижения в нижнекаменноугольном водоносном горизонте с полным его осушением над горными выработками, до отметки  $-300$  м (см. рис. 6). Расход водоотлива из нижнекаменноугольного горизонта (с учетом перетекания из келловейского горизонта) в течение 10 лет возрастает от  $1240$  до  $2420 \text{ м}^3/\text{ч}$  с последующей стабилизацией на уровне  $2090 \text{ м}^3/\text{ч}$ . Доля перетекания из келловейского горизонта в общем расходе из нижнекаменноугольного горизонта незначительна ( $10-15\%$ ), в абсолютных величинах она увеличивается от  $213$  до  $321 \text{ м}^3/\text{ч}$ . Абсолютные отметки уровней подземных вод в руднокристаллическом водоносном горизонте в центре депрессии составят  $-525$  м. Снижение уровня нижнекаменноугольного горизонта до отметки  $-300$  м произойдет через 13 лет после начала осушения, при этом снижение уровня в келловейском горизонте прогнозируется величиной около  $170$  м (см. рис. 6).

*Прогнозные оценки изменения гидрогеологических условий при отработке запасов рудного целика в интервале  $-300 \div -370$  м (вариант № 3).* Возможность отработки целика выше отметки  $-370$  м определяется эффективностью водопонижения в нижнекаменноугольном водоносном горизонте с полным его осушением над горными выработками.

Расход водоотлива, обеспечивающий необходимое снижение уровня подземных вод в нижнекаменноугольном водоносном горизонте, возрастает в течение 11 лет от  $1163$  до  $2600 \text{ м}^3/\text{ч}$  с последующей стабилизацией на уровне  $2200 \text{ м}^3/\text{ч}$  (см. рис. 6). При заблаговременном начале водопонижения в этом горизонте через 11 лет будет достигнуто необходимое снижение уровня, что обеспечит возможность безопасной отработки целика.

Величина водоотлива из системы скважин, дренирующих нижнекаменноугольный горизонт, практически полностью формируется за счет его ресурсов и перетекания из келловейского горизонта, к концу планируемых работ она составит  $325 \text{ м}^3/\text{ч}$ , порядка  $12\%$  от общего расхода дренажа. Расход бокового притока непосредственно из руднокристаллического горизонта

на начальном этапе возрастет до  $358 \text{ м}^3/\text{ч}$ , в последующем снизится до  $190 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

При реализации вариантов № 2 или № 3 обязательным условием является полное осушение нижнекаменноугольного водоносного горизонта (до отметки  $-300$  м) над всей обрабатываемой площадью с понижением уровня на  $350$  м от существующего в настоящее время (над выработанным пространством) или на  $450$  м от статического.

В ходе опытно-производственного водопонижения в каменноугольном водоносном горизонте (1959–1961 гг.) в регионе образовалась обширная депрессия, зафиксированная на  $65$  км по простиранию рудного тела и в  $20$  км в лежащем боку месторождения. В апреле–августе 1961 г. максимальная производительность опытного понижения (7 скважин) достигала  $1280 \text{ м}^3/\text{ч}$ , при этом в центре депрессии понижение составило  $210$  м ( $\sim 50\%$  от статического).

При ведении опытного, а затем опытно-производственного водопонижения (1988–1992 гг.) водоотбор из нижнекаменноугольного горизонта осуществлялся 12 водопонижающими скважинами и достиг  $900 \text{ м}^3/\text{ч}$  к 01.12.1991 г. Уровни подземных вод были снижены в центре депрессии в каменноугольных известняках на  $220-250$  м ( $55\%$  от статического), в руднокристаллическом массиве на  $160-180$  м.

Исходя из этого, полученные в нашей работе значения водоотлива из нижнекаменноугольного горизонта ( $2.4-2.6$  тыс.  $\text{м}^3/\text{ч}$ ), обеспечивающие его полное осушение на площади около  $50$  га (а не только в центре депрессии), являются вполне обоснованными и правдоподобными.

## ФАКТОРЫ, ОСЛОЖНЯЮЩИЕ ВЕДЕНИЕ ГОРНЫХ РАБОТ

Снижение гидростатических напоров в водоносных горизонтах приводит к снятию эффекта гидростатического взвешивания пород и соответствующему увеличению напряжений в скелете породы. При этом вследствие развития процессов депрессионной консолидации формируется зона деформаций пород и земной поверхности.

Оседания земной поверхности, связанные с добычей подземных флюидов, известны уже почти столетие [39]. Они угрожают крупным городским центрам и дельтовым районам по всему миру, таким как Бангкок, Джакарта, Мехико, Хошимин, где скорость оседания превышает  $10$  см/год [15, 37, 38].

На Яковлевском руднике в период опытного водопонижения максимальные оседания земной поверхности зафиксированы в районе расположения дренажных скважин, величина оседаний уменьшалась с удалением от рудной залежи вкост простирания. Скорость оседаний в районе работы дренажной системы составляла порядка

5.0 мм/мес, в остальных районах до 0.6–2.6 мм/мес. Суммарные максимальные зафиксированные оседания составили 250 мм. Наблюдения за оседаниями поверхности после прекращения водоотбора показали, что процесс депрессионного уплотнения носит необратимый характер: восстановление уровней в осушаемых водоносных горизонтах не привел к подъему поверхности [2, 15]. Деформация земной поверхности, в основном, определялась сжатием глинистых пород бат-байосского горизонта.

Важнейший показатель, используемые при расчетах водопритоков и проектировании системы осушения рудника, это коэффициент фильтрации слабопроницаемой толщи, разделяющей нижнекаменноугольный и руднокристаллический горизонты. Во временном разрезе его значения за 60 лет увеличились на 3 порядка (рис. 7). Причем этот рост хорошо коррелирует с основными этапами изучения и освоения месторождения:  $k_0 = (1-6) \cdot 10^{-6}$  м/сут по результатам опытно-промышленного (1959–1961 гг.), опытного и опытно-производственного водопонижения (1988–1992 гг.);  $k_0 = 6 \cdot 10^{-5}$  м/сут после проходки горных выработок (1997 г.);  $k_0 = 2.5 \cdot 10^{-4}$  м/сут после начала промышленной добычи (2005 г.). Особенно показательными являются результаты, полученные разными исследователями в последние годы при анализе гидрогеологических условий в процессе развития горнодобывающих работ: за несколько лет значение коэффициента фильтрации разделяющей толщи увеличилось в 4 раза до  $k_0 = 9 \cdot 10^{-4}$  м/сут.

Причина увеличения проницаемости разделяющей слабопроницаемой толщи — деформационные процессы в предохранительном целике, вызванные неполной закладкой выработанного пространства. По данным многолетних натуральных наблюдений на Яковлевском руднике оседание подработанной толщи богатых железных

руд приводит к формированию мульды, которая проявляется в том числе и на поверхности [6, 7, 16, 34]. В центре мульды оседание поверхности земли превысило 1 м (средняя скорость 12 мм/мес). Оседание целика на горизонте –370 м более 2 м, скорость оседаний верхней границы очистных работ составляет 16 мм/мес, что в 1.3 раза выше, чем скорость оседания земной поверхности. Сдвигание земной поверхности по отношению к оседанию верхней границы выработанного пространства запаздывает во времени на несколько лет (временной лаг 10–12 лет).

По результатам обработки натуральных наблюдений с использованием глубинных реперов были получены значения оседания, наклонов, кривизны. Аналитическими расчетами определена граничная кривизна, которая соответствует высоте зоны водопроводящих трещин [9, 10]. Ее величина, считая от кровли закладочных выработок (горизонт –370 м), составляет 11 м, т.е. толщина, оставаемая как защитная, на 15–18% нарушена техногенными водопроводящими трещинами.

Негативными факторами для возникновения прорывов подземных вод являются вывалообразование и куполение кровли выработок на горизонте –370 м. По данным геодинамического мониторинга, проводимого сотрудниками геолого-маркшейдерского отдела Яковлевского рудника, а также кафедрой горных предприятий и подземных сооружений Горного университета (г. Санкт-Петербург), высота некоторых образовавшихся куполов обрушения достигает 10–15 м [13, 24, 30].

При расширении фронта добычных работ необходимо осуществить полное осушение нижнекаменноугольного водоносного горизонта, для чего потребуется реконструкция системы подземного водоотлива с увеличением его производительности. Вариант осушения этого водоносного горизонта с поверхности будет связан со значительными затратами, которые вызваны необходимостью бурения скважин большой глубины (550 м) и оборудовании каждой из них насосами. Рациональным вариантом осушения было бы строительство подземного дренажного контура с восстающими скважинами, обеспечивающими необходимое снижение уровня нижнекаменноугольного горизонта. Такие системы осушения успешно эксплуатируются в течение десятков лет на Лебединском и Южно-Лебединском месторождениях КМА, Соколовско-Сарбайской группе железорудных месторождений (Казахстан) [14, 21].

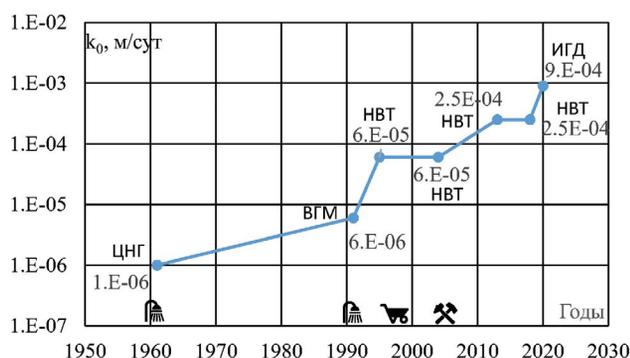


Рис. 7. Изменение значения коэффициента фильтрации разделяющей толщи, полученного при гидрогеологических расчетах. Организация, проводившая работы: ЦНГ – ЦНИИгоросушение [8]; ВГМ – ВЮГЕМ [25]; НВТ – НТЦ НОВОТЭК [1, 2]; ИГД – ИГД УрО РАН [16].

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Яковлевское месторождение — сложно-структурное, что определяется особенностями его геологического строения. Оно характеризуется наличием двух этажей: кристаллический фундамент

и осадочная толща мощностью более 500 м. Богатые железные руды мощностью до 400 м приурочены к кристаллическому фундаменту и залегают с углом падения  $60^{\circ}$ – $70^{\circ}$ , осадочные отложения имеют практически горизонтальное залегание.

Особенности геологического строения приводят к значительной изменчивости глубины залегания кровли и подошвы пластов, их мощностей и как следствие фильтрационных характеристик (в частности, проводимости).

Глубина отработки в настоящее время более 500 м, планируется ее увеличение на 200 м. Над горными выработками находится водоносная система из 9 водоносных горизонтов, из них основной источник обводнения рудника — нижнекаменноугольный горизонт с напорами в естественных условиях до 440 м.

Месторождение обрабатывается системой с закладкой выработанного пространства, однако из-за неполной закладки выработанного пространства происходит деформация подошвы защитного целика и его оседание. В результате этих процессов формируется зона водопроводящих трещин. Фиксируется также мульда сдвигения на поверхности земли.

В процессе освоения месторождения произошло изменение фильтрационных свойств массива горных пород в пространстве и во времени, т.е. основных параметров для выполнения достоверного прогноза. За 60 лет значение коэффициента фильтрации разделяющего слоя между руднокристаллическим и нижнекаменноугольным горизонтом увеличились на 3 порядка: от  $10^{-6}$  м/сут в ходе опытно-промышленного водопонижения до  $10^{-3}$  м/сут в настоящее время.

Для дальнейшего освоения месторождения потребуется полное осушение нижнекаменноугольного горизонта, тогда суммарный расход водоотлива увеличится в 5 раз, что приведет к необходимости реорганизации системы осушения. Эффективность ее работы может быть обеспечена с помощью строительства подземного дренажного контура с восстающими скважинами, обеспечивающими необходимое снижение уровня нижнекаменноугольного горизонта.

*Работа выполнена в рамках государственного задания ИГД УрО РАН № 075-00412-22 ПР. Тема 2 (2022–2024 гг.) “Разработка геоинформационных технологий оценки защищенности горнопромышленных территорий и прогноза развития негативных процессов в недропользовании” (FUWE-2022-0002) г. р. № 1021062010532-7-1.5.1.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анализ гидрогеомеханических условий шахтного поля Яковлевского месторождения, оценка качества массива горных пород и принятых систем разработки железных руд. Белгород: ООО НТЦ “НОВОТЭК”, 2002.
2. Гензель Г.Н., Еланцева Л.А., Зайцев Д.А. Создание численной геофильтрационной модели Яковлевского месторождения и прогноз притоков подземных вод в проектируемые горные выработки. Белгород: ООО НТЦ “НОВОТЭК”, 2018.
3. Гензель Г.Н., Осипенко Ю.С., Еланцева Л.А. Выполнить обоснование безопасных условий отработки Яковлевского железорудного месторождения под неосушенным нижекарбонным водоносным комплексом без сооружения водонепроницаемых перемычек. Согласование результатов в Госгортехнадзоре России. Белгород: ООО НТЦ “НОВОТЭК”, 2004. 121 с.
4. Геология, гидрогеология и железные руды бассейна Курской магнитной аномалии (КМА). А.Т. Бобрышева (ред.). М.: Недра, 1972. Т. II. 480 с.
5. Гидрогеология СССР. Воронежская, Курская, Белгородская, Орловская, Липецкая, Тамбовская области. А.Т. Бобрышева (ред.). М.: Недра, 1972. Т. IV. 498 с.
6. Голубничий Д.В., Гилязев Д.Х., Игнатенко И.М., Хаустов В.В. Особенности обеспечения экологической безопасности подземной разработки Яковлевского месторождения богатых железных руд // Вестник Воронежского государственного университета. Сер. Геология. 2023. № 2. С. 94–103.
7. Григорьев А.М., Зотеев О.В., Макаров А.Б. Геомеханическое обоснование мониторинга массива при разработке руд Яковлевского месторождения КМА под неосушенными водоносными горизонтами // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2013. № S4. С. 27–37.
8. Гуркин А.Я. Исследование эффективности дренажных систем в сложных условиях осушения на примере Яковлевского месторождения КМА: автореф. дис. ... канд. тех. наук / Моск. ин-т радиоэлектроники и горной электромеханики. М.: [б. и.], 1964. 17 с.
9. Гусев В.Н., Илюхин Д.А., Журавлев А.Е. Оценка степени нарушенности подрабатываемой толщи техногенными водопроводящими трещинами по данным геомеханического мониторинга в горных выработках Яковлевского рудника // Записки Горного института. 2013. Т. 204. С. 74–81.
10. Гусев В.Н. Прогноз безопасных условий разработки свиты угольных пластов под водными объектами на основе геомеханики техногенных водопроводящих трещин // Записки Горного института. 2016. Т. 221. С. 638–643.
11. Дашко Р.Э. Инженерно-геологическая характеристика и оценка богатых железных руд Яковлевского рудника // Записки Горного института. СПб. 2006. Т. 168. С. 97–104.
12. Дашко Р.Э., Феллер Е.Н. Геотехническая и инженерно-геологическая оценка безопасности добычи богатых железных руд на Яковлевском руднике (Курская магнитная аномалия) // Геотехника. 2013. № 5–6. С. 26–38.
13. Дашко Р.Э., Феллер Е.Н. Формирование и развитие горно-геологических процессов в зависимости от изменения инженерно-геологических и гидрогеологических условий на Яковлевском руднике // Записки Горного института. 2012. Т. 199. С. 151–160.
14. Ефремов Е.Ю., Рыбников П.А., Рыбникова Л.С. Обоснование осушения гидрогеодинамической системы “водовмещающие отложения – дезинтегрированный массив” при подземной разработке железорудных месторождений // Успехи современного естествознания. 2023. № 3. С. 47–57.
15. Журин С.Н. Управление состоянием массива при подземной отработке месторождений руд черных

- металлов в сложных гидрогеологических условиях: автореф. дис. ... докт. техн. н. М.: МГГУ, 1998. 45 с.
16. *Зотеев О.В.* Обоснование безопасной отработки центрального участка Яковлевского месторождения при расширении границ выемки до гор. –525 м и существующего горного отвода по флангам. Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2020. 206 с.
  17. *Зотеев О.В.* Обоснование безопасных и эффективных условий отработки Яковлевского железорудного месторождения под водоносным горизонтом. Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2007. 110 с.
  18. *Зотеев О.В., Макаров А.Б., Фаустов С.И.* Проблемы отработки Яковлевского железорудного месторождения // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2008. № 8. С. 4–8.
  19. *Илюхин Д.А.* Прогноз развития зоны водопродвижения трещин при разработке Яковлевского месторождения богатых железных руд: дис. канд. техн. наук. Санкт-Петербург, 2014. 125 с.
  20. *Котлов С.Н., Целищев Н.А., Сотник Е.А., Гилязов Д.Х.* Геолого-гидрогеологические факторы формирования водопритоков в горные выработки Яковлевского рудника рудника // Горный журнал. 2023. № 5. С. 108–113.
  21. *Крамчанинов Н.Н., Петин А.Н., Погорельцев И.А.* Анализ состояния подземных вод горнопромышленного района КМА на территории Белгородской области // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Сер. Естественные науки. 2011. № 9 (104). С. 166–172.
  22. *Петров Д.Н.* Формирование напряженно-деформированного состояния горного массива до и после осушения // Записки Горного института. 2011. Т. 190. С. 232–239.
  23. *Протосеня А.Г., Петров Д.Н., Синякин К.Г., Мартмянов Г.А.* Натурные наблюдения за осадкой рудной потолочины при ведении горных работ на Яковлевском руднике // Записки Горного института. 2011. Т. 190. С. 158–162.
  24. *Протосеня А.Г., Потемкин Д.А.* Геомеханическое обоснование параметров водозащитной потолочины и защитного перекрытия при освоении Яковлевского месторождения // Записки Горного института. 2006. № 3. Т. 168. С. 127–136.
  25. Разработка рекомендаций по совершенствованию системы осушения шахтного поля в процессе строительства Яковлевского рудника / [Кол. авт. Забейда М.А., Зубова А.В., Еланцева Л.А. и др.]. Белгород: ВИ-ОГЕМ, 1990. 321 с.
  26. *Сергеев С.В., Лябах А.И., Зайцев Д.А.* Опыт разработки богатых железных руд Яковлевского месторождения КМА // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Сер. Естественные науки. 2011. № 3 (98). С. 200–208.
  27. *Сергеев С.В., Лябах А.И., Квачев В.Н., Севрюков В.В.* Геолого-гидрогеологическая характеристика Яковлевского месторождения // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Сер. Естественные науки. 2011. № 9 (104). С. 147–154.
  28. *Сергеев С.В.* Формирование горного давления при вскрытии месторождений КМА // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Сер. Естественные науки. 2008. № 3 (43). С. 197–202.
  29. *Соколов И.В., Смирнов А.А., Антипин Ю.Г., Никитин И.В.* О формировании предохранительной подушки при отработке подкарьерных запасов трубки “Удачная” системами с обрушением // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2023. № 2. С. 322–334.
  30. *Трубицын Д.С., Дешевых Г.Ю.* Гидрогеологическое районирование территории южной части ЦФО с уточнением границ структур II, III порядков // Вестник Воронежского государственного университета. Сер. Геология. 2021. № 2. С. 83–93.
  31. *Трушко В.Л., Протосеня А.Г., Дашко Р.Э.* Геомеханические и гидрогеологические проблемы освоения Яковлевского месторождения // Записки Горного института. 2010. Т. 185. С. 9–18.
  32. *Трушко В.Л., Трушко О.В.* Комплексное освоение железорудных месторождений на основе конкурентоспособных подземных геотехнологий // Записки Горного института. 2021. Т. 250. С. 569–577.
  33. *Трушко О.В., Стрелецкий А.В.* Моделирование напряженно-деформированного состояния рудного массива Яковлевского рудника при ведении горных работ под защитным перекрытием // Записки Горного института. 2012. Т. 199. С. 60–63.
  34. *Тютюкова В.А., Голубничий Д.В., Гилязов Д.Х.* Определение оседаний земной поверхности по результатам совместной интерферометрической обработки данных космического радиолокационного зондирования Земли со спутников Sentinel-1a и Sentinel-1b // Маркшейдерия и недропользование. 2023. № 2 (124). С. 69–75.
  35. *Устюгов Д.Л.* Постояннодействующая гидродинамическая модель Яковлевского месторождения богатых железных руд (Курская магнитная аномалия) // Записки Горного института. 2013. Т. 200. С. 332–335.
  36. *Anderson M.P., Woessner W.W., Hunt R.J.* Applied Groundwater Modeling Simulation of Flow and Advective Transport. Academic Press; Second Edition. 2015. 564 p.
  37. *Gambolati G., Teatini P.* Geomechanics of subsurface water withdrawal and injection // Water Resour. 2015. N 51. P. 3922–3955.
  38. *Minderhoud P.S.J., Erkens G., Pham V.H., et al.* Impacts of 25 years of groundwater extraction on subsidence in the Mekong delta, Vietnam // Environ Res Lett. 2017. 12(6):064006. 14 p.
  39. *Pratt W.E., Johnson D.W.* Local Subsidence of the Goose Creek Oil Field // Journal of Geology. 1926. V. 34. P. 577–590.

## GROUNDWATER FLOW MODELING TO JUSTIFY SAFE MINING OF THE YAKOVLEVSKY IRON ORE DEPOSIT (KMA)

P. A. Rybnikov<sup>a,#</sup>, L. S. Rybnikova<sup>a,##</sup>

<sup>a</sup>*Institute of Mining, Ural Branch, Russian Academy of Sciences,  
ul. Mamina-Sibiryaka 58, Yekaterinburg, 620075 Russia*

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

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

The unique Yakovlevskoe iron ore deposit of the Kursk magnetic anomaly (КМА) is confined to a 40-km-long strip with an average width of 440 m, and the thickness of ore layers varying from 50 to 465 m. Rich iron ores are confined to the crystalline basement and lie at a depth of 470–550 m with an angle of incidence 60–70°. Industrial mining began in 2005 at the Yakovlevsky underground mine using a system with backfilling of mined-out space. Mining is carried out under very difficult hydrogeological conditions: at the top of the productive horizon there is a high-pressure multi-layer system of the Dnieper-Donets artesian basin. Directly on the foundation rocks lies the Lower Carboniferous aquifer (under natural conditions with a pressure of up to 440 m), there is no reliable sustained aquitard: the separating weakly permeable strata is represented by clay deposits (thickness from 0.2 to 30 m) and dense carbonated formations in the roof of the ore-crystalline strata (thickness from 0.2 to 30 m, up to 60 m). Drainage of the developed area of the deposit is carried out underground by draining only the ore body using horizontal and inclined-rising wells. Development of the deposit has already led to a significant decrease in groundwater levels and a change in the parameters of the separating protective layer. The possibility of expanding the front of mining operations both in area and in depth requires a serious hydrogeological justification. Further development of the Yakovlevsky iron ore deposit can be carried out by increasing the mining depth (to a horizon of –525 m) or by excavating a safety pillar in the range from –300 to –370 m. The implementation of these options will require preliminary drainage of the Lower Carboniferous aquifer, the consumption of such water reduction will be about 4 thousand m<sup>3</sup>/hour and will lead to the formation of an extensive depression cone.

**Keywords:** *hydrogeological conditions, pumping, heterogeneity, plan-spatial model, water strikes, aquifer, aquitard, rich iron ores, zones of water-conducting cracks, change in filtration properties*

## REFERENCES

- [Analysis of hydrogeomechanical conditions of the mine field of the Yakovlevskoe deposit, assessment of the quality of the rock mass and the adopted iron ore mining systems]. Belgorod, OOO NTC “NOVOTEK”, 2002. (in Russian)
- Genzel, G.N., Elantseva, L.A., Zaitsev, D.A. [Creation of a numerical geofiltration model of the Yakovlevskoe deposit and forecast of groundwater inflows into the designed mine workings]. Belgorod, OOO NTC “NOVOTEK”, 2018. (in Russian)
- Genzel, G.N., Osipenko, Yu.S., Elantseva, L.A. [To carry out a substantiation of safe conditions for mining the Yakovlevskoe iron ore deposit under an undrained lower Carboniferous aquifer complex without the construction of waterproof lintels. Coordination of the results with the Gosortekhnadzor of Russia]. Belgorod, OOO NTC “NOVOTEK”, 2004121 p. (in Russian)
- [Geology, hydrogeology and iron ores of the Kursk Magnetic Anomaly basin (КМА)] A.T. Bobrysheva, Ed., Moscow, Nedra Publ., 1972, vol. II, 480 p. (in Russian)
- [Hydrogeology of the USSR. Voronezh, Kursk, Belgorod, Oryol, Lipetsk, Tambov regions]. A.T. Bobrysheva, Ed., Moscow, Nedra Publ., 1972, vol. IV, 498 p. (in Russian)
- Golubnichii, D.V., Gilyazev, D.Kh., Ignatenko, I.M., Khaustov, V.V. [Features of ensuring environmental safety of underground mining of the Yakovlevskoye rich iron ore deposit]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya*, 2023, no. 2, pp. 94–103. (in Russian)
- Grigoriev, A.M., Zoteev, O.V., Makarov, A.B. [Geomechanical justification for massif monitoring during the development of ores of the Yakovlevskoye KMA deposit under undrained aquifers]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal)*, 2013, no. S4, pp. 27–37. (in Russian)
- Gurkin, A.Ya., [The study of drainage system efficiency under complex draining conditions by the example of Yakovlevskoe ore deposit KMA]. Extended abstract Cand. Sci. (Techn.) dissertation. Moscow, 1964, 17 p. (in Russian)
- Gusev, V.N., Ilyukhin, D.A., Zhuravlev, A.E. [Assessment of the degree of undermining strata disturbance by man-made water-conducting cracks according to geomechanical monitoring data in mine workings at the Yakovlevskoe mine]. *Zapiski Gornogo instituta*. 2013, vol. 204, pp. 74–81. (in Russian)
- Gusev, V.N. [Forecast of safe conditions for developing a suite of coal seams under water bodies based on the geomechanics of man-made water-conducting cracks]. *Zapiski Gornogo instituta*, 2016, vol. 221, pp. 638–643. (in Russian)
- Dashko R.E. [Engineering geological characteristics and assessment of rich iron ores of the Yakovlevskoe mine]. *Zapiski Gornogo instituta*, 2006, vol. 168, pp. 97–104. (in Russian)
- Dashko, R.E., Feller, E.N. [Geotechnical and engineering geological assessment of the safety of mining rich iron ores at the Yakovlevskoe mine (Kursk magnetic anomaly)]. *Geotekhnika*, 2013, no. 5–6, pp. 26–38. (in Russian)
- Dashko, R.E., Feller, E.N. [Formation and development of mining geological processes depending on changes in engineering geological and hydrogeological conditions at the Yakovlevskoe mine]. *Zapiski Gornogo instituta*, 2012, vol. 199, pp. 151–160. (in Russian)
- Efremov, E.Yu., Rybnikov, P.A., Rybnikova, L.S. [Justification for draining the hydrogeodynamic system “water-bearing sediments - disintegrated massif” upon underground mining of iron ore deposits]. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*, 2023, no. 3, pp. 47–57. (in Russian)
- Zhurin, S.N. [Management of the massif state upon underground mining of ferrous metal ore deposits under difficult hydrogeological conditions]. Extended abstract Doctoral Sci. (Techn.) dissertation. Moscow, MGGU Publ., 1998, 45 p. (in Russian)
- Zoteev, O.V. [Justification for safe mining of the central section of the Yakovlevskoe deposit upon expanding the excavation boundaries to –525 m horizon and existing mining allotment at the sides]. Yekaterinburg, IGD UrO RAN, 2020, 206 p. (in Russian)
- Zoteev, O.V. [Justification of safe and effective conditions for mining the Yakovlevskoe iron ore deposit under an aquifer]. Yekaterinburg, IGD UrO RAN, 2007, 110 p. (in Russian)
- Zoteev, O.V., Makarov, A.B., Faustov, S.I. [Problems of mining Yakovlevskoye iron ore deposit]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal*, 2008, no. 8, pp. 4–8. (in Russian)
- Ilyukhin, D.A. [Forecast of the development of water-conducting fracture zone during the development of Yakovlevskoe deposit of rich iron ores]. Cand. Sci. (Techn.) dissertation. St. Petersburg, 2014, 125 p. (in Russian)

20. Kotlov, S.N., Tselishchev, N.A., Sotnik, E.A. Gilyazev, D.Kh. [Geological and hydrogeological factors of the formation of water inflows into the mine workings of the Yakovlevskoe mine]. *Gornyi zhurnal*, 2023, no. 5, pp. 108–113. (in Russian)
21. Kramchaninov, N.N., Petin, A.N., Pogorel'tsev, I.A. [Analysis of the groundwater state in the KMA mining region in the territory of the Belgorod oblast]. *Nauchnye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennye nauki*, 2011, no. 9 (104), pp. 166–172. (in Russian)
22. Petrov, D.N. [Formation of the stress-strain state of a mountain massif before and after drainage]. *Zapiski Gornogo instituta*, 2011, vol. 190, pp. 232–239. (in Russian)
23. Protosenya, A.G., Petrov, D.N., Sinyakin, K.G., Martem'yanov, G.A. [Field observations of the settlement of the ore ceiling during mining operations at the Yakovlevskoe mine]. *Zapiski Gornogo instituta*, 2011, vol. 190, pp. 158–162. (in Russian)
24. Protosenya, A.G., Potemkin, D.A. [Geomechanical justification of the parameters of the waterproof roof and protective ceiling during the development of the Yakovlevskoe deposit]. *Zapiski Gornogo instituta*, 2006, vol. 168, no. 3, pp. 127–136. (in Russian)
25. [Development of recommendations for improving the mine field drainage system during the construction of the Yakovlevskii mine]. Zabeida, M.A., Zubova, A.V., Elantseva, L.A. Belgorod, VIOGEM Publ., 1990, 321 p. (in Russian)
26. Sergeev, S.V., Lyabakh, A.I., Zaitsev, D.A. [Experience in the development of rich iron ores at the Yakovlevskoe deposit of the KMA]. *Nauchnye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya Estestvennye nauki*, 2011, no. 3 (98), pp. 200–208. (in Russian)
27. Sergeev, S.V., Lyabakh, A.I., Kvachev, V.N., Sevryukov, V.V. [Geological and hydrogeological characteristics of the Yakovlevskoe deposit]. *Nauchnye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya Estestvennye nauki*, 2011, no. 9 (104), pp. 147–154. (in Russian)
28. Sergeev, S.V. [Formation of rock pressure during the opening of KMA deposits]. *Nauchnye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya Estestvennye nauki*, 2008, no. 3 (43), pp. 197–202. (in Russian)
29. Sokolov, I.V., Smirnov, A.A., Antipin, Yu.G., Nikitin, I.V. [About formation of protective cushion in mining under open pit bottom with the caving methods at Udachnaya pipe]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle*, 2023, no. 2, pp. 322–334 (in Russian).
30. Trubitsyn, D.S., Deshevikh, G.Yu. [Hydrogeological zoning of the territory of the southern part of the Central Federal District with clarification of the boundaries of structures of II and III orders]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya Geologiya*, 2021, no. 2, pp. 83–93. (in Russian)
31. Trushko, V.L., Protosenya, A.G., Dashko, R.E. G [Geomechanical and hydrogeological problems of development of the Yakovlevskoye deposit]. *Zapiski Gornogo instituta*, 2010, vol. 185, pp. 9–18. (in Russian)
32. Trushko, V.L., Trushko, O.V. [Integrated development of iron ore deposits based on competitive underground geotechnologies]. *Zapiski Gornogo instituta*, 2021, vol. 250, pp. 569–577. (in Russian)
33. Trushko, O.V., Streletskii, A.V. [Modeling of the stress-strain state of ore mass at the Yakovlevskii mine during mining operations under a protective cover]. *Zapiski Gornogo instituta*, 2012, vol. 199, pp. 60–63. (in Russian)
34. Tyutyukova, V.A., Golubnichii, D.V., Gilyazev, D.Kh. [Determination of the Earth's surface subsidence based on the results of joint interferometric processing of space radar sounding data from the Sentinel-1a and Sentinel-1b satellites]. *Marksheideriya i nedropol'zovanie*, 2023, no. 2 (124), pp. 69–75. (in Russian)
35. Ustyugov, D.L. [Permanent hydrodynamic model of the Yakovlevskoe deposit of rich iron ores (Kursk magnetic anomaly)]. *Zapiski Gornogo instituta*, 2013, vol. 200, pp. 332–335. (in Russian)
36. Anderson, M.P., Woessner, W.W., Hunt, R.J. Applied groundwater modeling simulation of flow and advective transport. Academic Press, 2nd Edition, 2015, 564 p.
37. Gambolati, G., Teatini, P. Geomechanics of subsurface water withdrawal and injection, *Water Resour.* 2015, vol. 51, pp. 3922–3955.
38. Minderhoud, P.S.J., Erkens, G., Pham, V.H. et al. Impacts of 25 years of groundwater extraction on subsidence in the Mekong delta, Vietnam. *Environ. Res. Lett.*, 2017, no. 12(6), paper 064006, 14 p.
39. Pratt, W.E., Johnson, D.W. Local subsidence of the Goose Creek oil field. *Journal of Geology*, 1926, vol. 34, pp. 577–590.

УДК 624.131.4

## ОЦЕНКА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СОСТАВЛЯЮЩИХ КОМПОЗИТНОЙ МОДЕЛИ “ГРУНТ–ЦЕМЕНТНЫЙ МАТЕРИАЛ”

© 2024 г. В. Н. Кутергин<sup>1,\*</sup>, Ф. С. Карпенко<sup>1</sup>, С. И. Фролов<sup>1</sup><sup>1</sup>Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН,  
Уланский пер. 13, стр. 2, Москва, 101000 Россия

\*E-mail: kvan20@bk.ru

Поступила в редакцию 27.05.2024 г.

После доработки 28.08.2024 г.

Принята к публикации 10.10.2024 г.

Грунтовые массивы имеют тесный контакт с фундаментами, сваями, ограждающими и закрепляющими конструкциями (анкерами, шпунтами, подпорными стенками), а также армирующими грунт при технической мелиорации инъекционными жилами. Телом многих из них служат твердые цементные материалы, имеющие межфазную границу раздела с грунтом. Систему “грунт–материал” можно рассматривать как композитную, в которой составляющие при взаимодействии проявляют новые качества. Разработаны специальные методики сдвига моделей свай, представляющих собой плашки из цементного материала, по образцам грунта. Выполнены экспериментальные исследования взаимодействия цементного материала и вмещающих дисперсных и скальных пород, изучены его особенности, обусловленные материалом, концентрацией вяжущего, характером поверхности, обводнением, взаимопроникновением цементного материала и вмещающих пород. Приведены результаты исследований влияния гладкой и шероховатой поверхности плашек в условиях обводнения, даны значения коэффициентов трения, контактного сцепления. Предложена зависимость для определения предельных напряжений сдвига композитных моделей при контакте песков и скальных пород с материалом плашек. Для скальных пород, в которых моделировалось твердение материала свай, получены значения предельных напряжений и модулей деформаций сдвига в зависимости от концентрации вяжущего в цементном растворе.

**Ключевые слова:** *грунты, цементный материал, сваи, композитная модель, прочность на сдвиг, коэффициент трения, контактное сцепление, концентрация вяжущего*

DOI: 10.31857/S0869780924060063 EDN: ALUETY

### ВВЕДЕНИЕ

Грунтовый массив может служить вмещающим объемом, основанием или телом инженерных сооружений. При этом он находится в тесном контакте с материалом сооружений: основаниями и стенами фундаментов, ограждающих и закрепляющих конструкций (анкеров, шпунтов, подпорных стенок), а также сеткой армирующих грунт инъекционных вкраплений и жил. Наиболее часто конструкции, а также рецептура инъекций проектируются на основе цементного материала.

Такую систему из неоднородных (гетерогенных) компонентов с границей раздела (поверхностью контакта) или промежуточным межфазным обводненным слоем можно рассматривать как композиционный материал (композит). Грунтовый массив, выступающий в роли заполнителя (матрицы), и армирующий элемент (цементный материал) находятся в определенном взаимодействии, при котором каждый из них проявляет

свои свойства, а композит в целом может обнаруживать новые качества, не присущие компонентам в отдельности.

Оценка особенностей подобного контактного взаимодействия, а также параметров прочности возникающей композитной системы “грунт–материал” важна для инженерных расчетов.

Наиболее масштабным по объемам и поверхности взаимодействия с грунтом можно считать использование свайных фундаментов, особенно при строительстве зданий повышенной этажности. Тенденция роста этажности сооружений наблюдается во многих российских крупных городах. В проектах высотных новостроек предусматривается более 30 этажей, при этом высота комплексов с “небоскребами” составляет не менее 100 м, а нагрузки на грунты оснований достигают значений ~1–2 МПа [7]. Выбор свайного фундаментирования определяется глубиной залегания прочных пород, которые могут воспринять такие высокие нагрузки. Свайные фундаменты в виде глубоких опор располагаются как в дисперсных,

так и в скальных породах оснований сооружений. Для высотных зданий глубина заложения свай может составлять 40–120 м.

Большие заглубления опор и высокие нагрузки на грунты обуславливают ряд особенностей, которые необходимо учитывать при проектировании [4, 5]. В частности, для расчетов несущей способности важное значение имеют особенности взаимодействия свай как с дисперсными грунтами массива, так и прорезаемыми ими скальными породами.

Величина напряжений сдвига, возникающих при перемещении свай относительно вмещающих пород, определяется силами трения (коэффициентом трения на контакте конструкции с грунтом,  $tg\varphi_s$ ) и адгезионными свойствами материалов (контактным сцеплением,  $C$ ).

Для массового проектирования свайных фундаментов в дисперсных грунтах расчет сопротивлений по боковой поверхности забивных, вдавливаемых свай и свай-оболочек регламентируется СП 24.13330.2021 “Свайные фундаменты”, но имеет ограничения по длине свай (до 40 м). Для прорезаемых скальных пород рекомендуется расчет на основе результатов определения их прочности, но не на сдвиг, а на одноосное сжатие.

Учет непосредственно сил трения для гравитационных сооружений при плоском сдвиге предписан СП 23.13330.2018 “Основания гидротехнических сооружений”. Рекомендованы прямые определения  $tg\varphi_s$ , а в случае их отсутствия – принятие значений, составляющих не более 2/3 значения коэффициента внутреннего трения грунта ( $tg\varphi$ ), контактирующего с сооружением.

Для скальных грунтов параметры сдвига ( $tg\varphi$  и  $C$ ) предписывается определять прямыми измерениями прочности на сдвиг. Для менее ответственных сооружений значения параметров табулированы и варьируют в широких пределах в зависимости от изменения их структуры, трещиноватости, раскрытия трещин и состава их заполнителя.

При оценке контактного сцепления  $C$  следует отметить, что проявление адгезионных свойств грунтов изучено и освещено недостаточно полно. Анализируя этот аспект взаимодействия грунтов и цементного материала, можно обратить внимание на исследования в смежных областях. Так, весьма близки теме исследований некоторые аспекты методики и результаты определения “прочности тангенциального сцепления” материала (цементного раствора) с различными типами кирпичной кладки, изложенные в работе [1]. Аналогичная задача актуальна и для грунтов, в частности скальных, контактирующих с цементным материалом конструкций.

Основная цель настоящих исследований – оценка прочности (коэффициента контактного

трения  $tg\varphi_s$ , коэффициента внутреннего трения  $tg\varphi$  и контактного сцепления  $C$ ) композитной системы “грунт–цементный материал” при взаимодействии компонентов в различных условиях.

Задачи исследований определялись условиями, обуславливающими характер взаимодействия, и заключались в оценке влияния:

- материала и характера поверхности;
- наличия или отсутствия обводнения;
- взаимопроникновения составляющих композитной системы “грунт–цементный материал”.

Для решения задач были выполнены серии экспериментов по определению сопротивления сдвигу композитных моделей “грунт–цементный материал”. Предварительно был выполнен комплекс испытаний грунтов природного массива. Полученные данные в последующем были использованы для сопоставительного анализа механических характеристик исходных образцов грунта и результатов испытаний композитных моделей.

В качестве исходного материала использовались образцы грунтов типового разреза, характерного для северной части г. Москвы, представляющего чередование дисперсных грунтов, а также выветрелых и монолитных скальных пород.

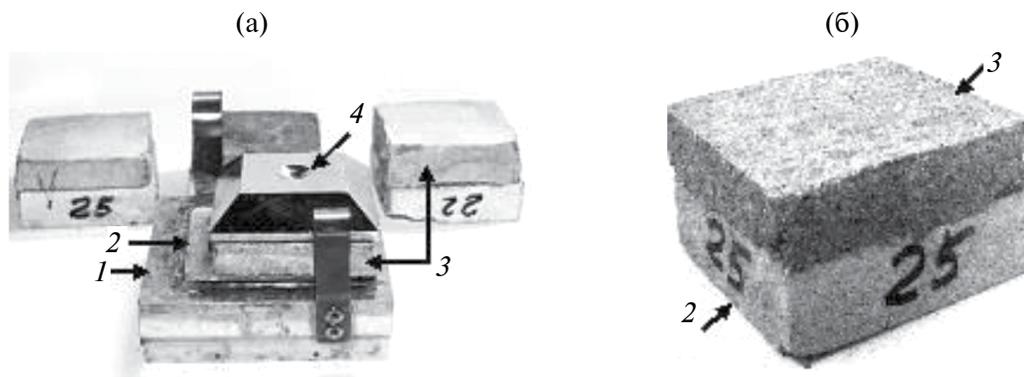
## ИСПЫТАТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Для испытаний природных дисперсных грунтов использовались приборы трехосного сжатия (стабилометры) типа СТ-70 [2, 3]. Испытания скальных и полускальных пород на сжимаемость и прочность выполнялись с помощью прибора трехосного сжатия скальных грунтов Control's 45-D0556, при всестороннем обжатии 0.0–12.0 МПа.

Исследования взаимодействия цементного материала и образцов грунтов проводились в ходе сдвиговых испытаний на приборе плоскостного сдвига Control's 50-C36/G2, с программируемым управлением и автоматической регистрацией параметров эксперимента.

Укрупненно основной испытательный узел сдвигового прибора показан на рис. 1а. В нижнюю, жестко закрепленную часть каретки прибора (1), помещался образец исследуемой породы (2). Вертикальная нагрузка в диапазоне давлений  $\sigma = 0.025–0.46$  передавалась через верхний штамп (4) прибора. В верхней подвижной части каретки (на рис. 1а ее кожух не показан) располагалась модель сваи (3), выполненная в виде цементной плашки квадратного сечения площадью 36 см<sup>2</sup> (рис. 1б).

Для оценки параметров прочности композитных моделей “грунт–цементный материал” разработаны и использовались методики, включающие несколько схем испытаний.



**Рис. 1.** Испытательный узел сдвигового прибора Control's 50-C36/G2 (а) и объект – испытываемый образец (б). Пояснения в тексте.

При подготовке к испытаниям грунт природного сложения располагался в нижней части сдвиговой обоймы таким образом, чтобы поверхность образца выступала над ее краем на 1–2 мм. При заполнении обоймы грунтом нарушенного сложения (песчаные образцы) достигалась его требуемая плотность. Затем на поверхность грунта помещалась плашка из материала сваи, верхняя часть обоймы поднималась над нижней, чтобы в зазоре между верхней и нижней частями обоймы оказалась плоскость контакта между грунтом и плашкой. В некоторых опытах образец грунта и плашка готовились совместно в специальной форме, а затем помещались в составную обойму сдвигового прибора.

В такой модели цементный раствор, как основной связующий компонент бетонного материала свай, при различных вариантах подготовки плашек моделировал, как гладкую поверхность цементной матрицы бетона, так и шероховатую мелкозернистого заполнителя. В качестве материала для плашек использовался раствор цемента марки М400 различной концентрации. Время затвердевания при различных концентрациях составляло 2 дня.

Испытания проводились путем сдвига верхней подвижной каретки сдвигового прибора (с плашкой из материала свай) относительно нижней неподвижной каретки, вмещавшей образец грунта. Измерялись горизонтальные сдвигающие усилия  $\tau$ , возникающие при перемещении верхней каретки с постоянной заданной скоростью 0.1 мм/мин. После испытаний (не менее 3-х при разных значениях вертикальной нагрузки  $\sigma$ ) определялись параметры сдвига в виде линейной зависимости

$$\tau = k \cdot \sigma + C,$$

где  $k = \operatorname{tg} \varphi_s$  или  $\operatorname{tg} \varphi$  – коэффициент трения, [д.е.];  $\sigma$  – давление, нормальное к плоскости сдвига, [МПа];  $\varphi_s$  или  $\varphi$  – угол трения [град.];  $C$  – сцепление [МПа].

Для оценки влияния факторов, обуславливающих особенности взаимодействия материала свай с грунтом, выполнены следующие серии опытов.

**Серия I. Испытания на сдвиг по грунту плашки из материала свай с гладкой поверхностью.** Плашка из материала свай готовилась с виброуплотнением в гладкой опалубке, поверхности которой покрывались глинистым раствором.

**Серия II. Испытания на сдвиг по грунту плашки из материала свай с шероховатой поверхностью.** Плашка из материала свай готовилась с виброуплотнением в опалубке, дно которой имело неровную, шероховатую поверхность.

**Серия III. Испытания на сдвиг по грунту плашки из материала, твердение которого происходило в контакте с поверхностью образца грунта природной влажности.** Плашка из материала свай готовилась с виброуплотнением в опалубке, а затем помещалась на поверхность грунта природной влажности, где и происходило твердение.

Сдвиг плашек в сериях I–III проводился в водной среде.

**Серия IV. Испытания на сдвиг по грунту плашки из материала с различным содержанием вяжущего компонента, твердение которого происходило в контакте с поверхностью образца водонасыщенного грунта.** Плашка из материала свай с различной концентрацией вяжущего компонента ( $V/C = 0.2–1.0$ ) готовилась виброуплотнением в опалубке, а затем помещалась на поверхность грунта. Твердение при этом происходило, как на поверхности, так и в верхней приграничной части грунта, куда раствор проникал, благодаря поровой воде, понижающей его вязкость.

#### КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ИССЛЕДОВАННЫХ ГРУНТОВ

Исходный грунтовый материал для исследований был охарактеризован комплексом определений состава и физико-механических свойств.

В испытаниях природных дисперсных пород были использованы четвертичные грунты, характеристика которых дана в табл. 1.

Нормативные характеристики физико-механических свойств исследованных древних (мезозойских и палеозойских) отложений, полученные по результатам трехосных испытаний образцов представлены в табл. 2.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Результаты испытаний, проведенных в рамках серии I (сдвиг гладкой плашки по грунту), показаны на рис. 2. Как видно из графиков, для песков, супесей и глин с увеличением дисперсности закономерно уменьшается трение и возрастает структурное сцепление. Для наиболее грубодисперсных, зернистых пород, даже в случае гладкой плашки все равно реализуются условия трения по шероховатой (зернистой) поверхности грунтов. Результат перемещения ровной, гладкой поверхности плашек отражает параметры трения, характерные для материала частиц, слагающих данный грунт. Для глинистых грунтов с преобладанием тонких частиц (до 50% и более), коэффициент трения составил  $k = tg\varphi_s \approx 0.41$  ( $\varphi_s \approx 22^\circ$ ). В супесях с преобладанием песчано-пылеватых частиц (до 80%)  $k = tg\varphi_s \approx 0.48$  ( $\varphi_s \approx 26^\circ$ ), в зернистых

грунтах с содержанием песчаных частиц до 95%  $k = tg\varphi_s \approx 0.58$  ( $\varphi_s \approx 30^\circ$ ).

Адгезионное взаимодействие зернистых и пылеватых грунтов с материалом гладких плашек практически отсутствует. Контактное сцепление глинистых частиц и поверхности гладких плашек в водной среде составило  $\sim 50$  кПа. Его проявление и величина могут быть обусловлены, т.н. липкостью грунта, т.е. возникновением сил взаимодействия между молекулами связанной воды и частицами грунта, с одной стороны, и молекулами воды и поверхности соприкасающегося с грунтом материала – с другой [6].

Результаты испытаний в серии II при сдвиге плашки с шероховатой поверхностью иллюстрирует рис. 3.

Графики свидетельствуют, что для грубодисперсных песков и супесей характер зависимостей не меняется. Для глин в данной серии испытаний шероховатая поверхность плашек при сдвиге затрагивает приконтактный объем образца грунта, в котором и формируются поверхности сдвига. При этом усилия, отнесенные к полной площади поверхности грунта, включающей и пустоты, являются функцией пористости ( $n$ ) и характеризуют внутреннее трение грунта:  $k = tg\varphi = f(n)$ . Полученные в опытах параметры прочности грунтового материала композитной модели ( $W = 37.1\%$ )

Таблица 1. Состав и свойства четвертичных грунтов

Глубина отбора, м	Наименование грунта	Содержание частиц, %			Влажность, %	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Плотность частиц, г/см <sup>3</sup>	Коэффициент пористости, д.е.	Пластичность, %			Показатель текучести, д.е.
		песок	пыль	глина					$W_p$	$W_L$	$I_p$	
<b>aQ<sub>III-V</sub></b>												
3.2	Супесь пластичная	76.5	7.8	15.7	16.6	2.12	2.67	0.469	17.6	13.8	3.8	0.74
6.0	Песок средней крупности	95.9	2.3	1.8	17.3	2.10	2.66	0.486				
4.0	Песок мелкий	93.2	3.1	3.7	17.0	2.10	2.66	0.482				
<b>fQ<sub>II</sub><sup>o-d</sup></b>												
12.5	Супесь пластичная	66.4	15.1	18.5	19.4	2.08	2.67	0.533	20.5	13.9	6.6	0.83
17.0	Песок средней крупности	92.2	2.9	4.9	18.4	2.09	2.65	0.501				
19.0	Песок средней крупности	90.6	4.7	4.7	16.7	2.10	2.65	0.473				

Таблица 2. Физико-механические свойства мезозойских и палеозойских пород

Геологический индекс	Верхнеюрские (J <sub>3</sub> )	Верхнекаменноугольные суворовские (C <sub>3sv</sub> )		Среднекаменноугольные мячковско-подольские (C <sub>3mc-pd</sub> )
Наименование породы	Глины твердые	Известняки глинистые и детритовые	Мергели	Известняки детритовые и глинистые
Интервал отбора, м	17.0–22.5	41.6–46.3	51.0–54.6	55.4–80.0
Нормативные значения				
Влажность (природная/ при полном водонасыщении), $W_e/W$ , %	30.1/37.1	8.4	5.4	9.2
Плотность, $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	1.86	2.26	2.35	2.21
Плотность частиц, $\rho_s$ , г/см <sup>3</sup>	2.73	2.73	2.82	2.70
Коэффициент поперечной деформации, $\nu$ , д.е.	0.30			
Модуль общей деформации, $E_0$ , МПа	20.4	6800	4900	5400
Параметры прочности	Сцепление $C$ , кПа	72	7100	1500
	Угол внутр. трения $\Phi$ , град	16	31	31
Прочность на сжатие, $R_c$ , МПа		16.9		

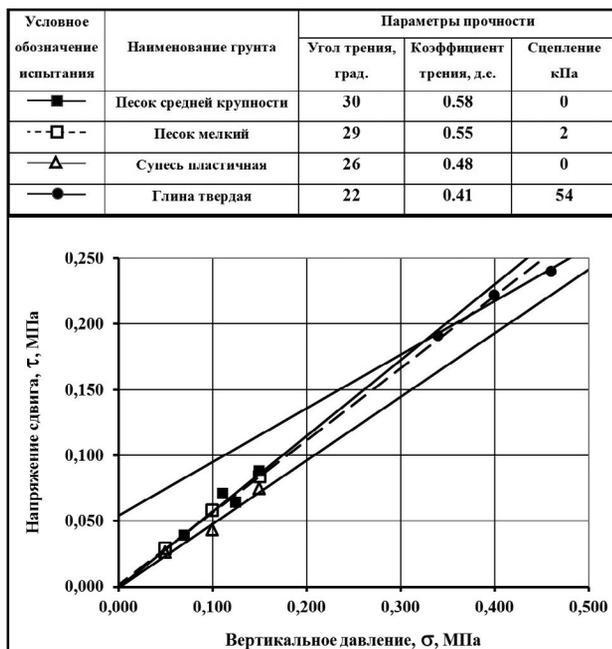


Рис. 2. Параметры прочности на сдвиг гладких пластинок из цементного материала по образцам дисперсных грунтов.

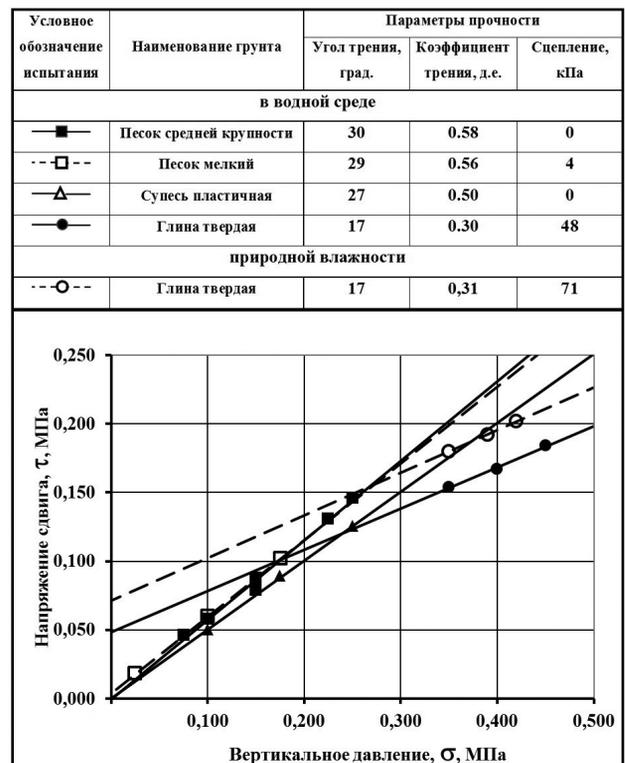


Рис. 3. Параметры прочности на сдвиг шероховатых пластинок из цементного материала по образцам дисперсных грунтов.

составили:  $\phi = 17^\circ$ ,  $C = 48$  кПа. Вовлечение в процесс сдвига структурных элементов грунта подтверждают результаты определения прочности глины природной влажности ( $W_e = 30.1\%$ ). Сопоставление показывает неизменность угла внутреннего трения, при этом сцепление вследствие меньшей влажности увеличивается до 71 кПа.

Аналогичные сериям I и II испытания, характеризующие взаимодействие между материалом свай и вмещающими грунтами, были выполнены также для скальных пород. Сопоставление результатов сдвига плашек с гладкой и шероховатой поверхностью иллюстрируют графики испытаний, приведенные на рис. 4.

Результаты показывают, что гладкая поверхность материала плашек вследствие некоторого сродства с контактирующими породами и процессов адгезии на границе раздела обуславливает повышенные значения структурного сцепления: наибольшие для известняков ( $C = 20$  кПа), наименьшие – для мергелей ( $C = 11$  кПа). При шероховатой поверхности контакта ведущая роль во взаимодействии принадлежит силам трения; структурная связность уменьшается до ничтожных 2–4 кПа, коэффициент трения составляет 0.55–0.59 д.е.

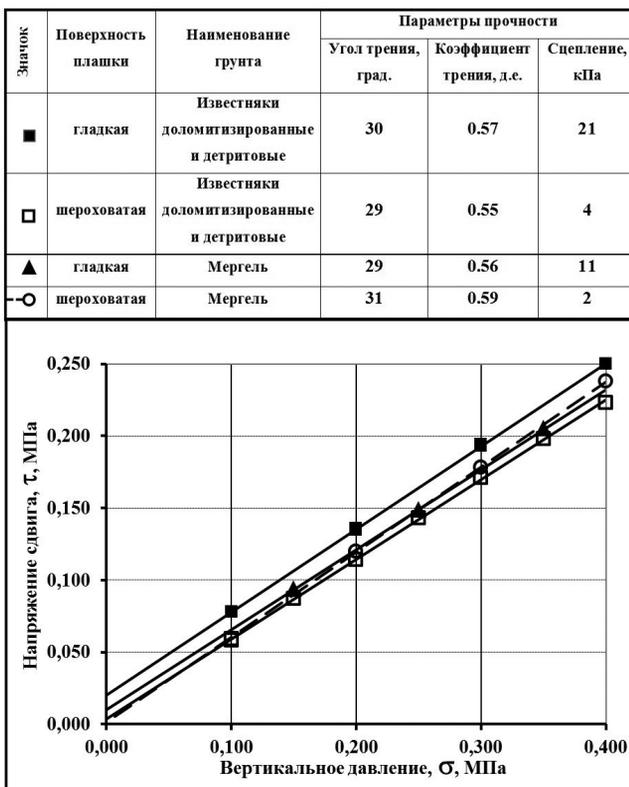


Рис. 4. Параметры прочности на сдвиг гладких и шероховатых плашек из цементного материала по образцам скальных пород.

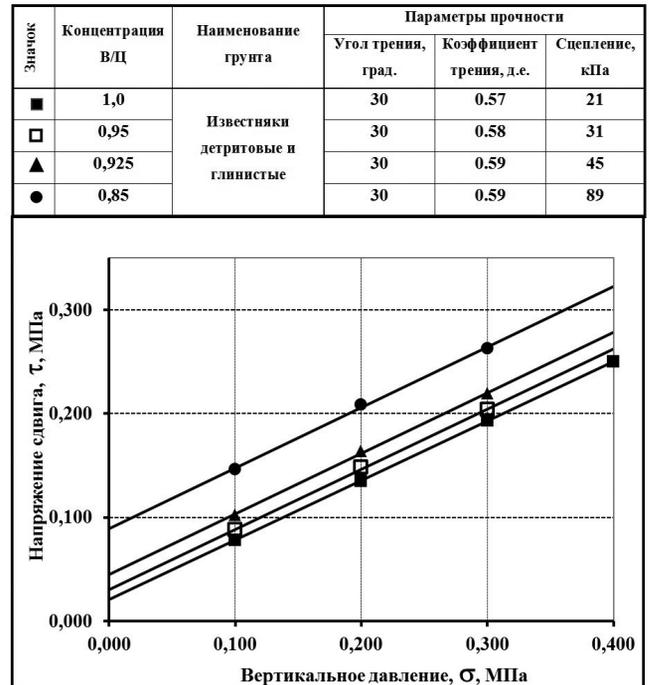


Рис. 5. Параметры прочности на сдвиг плашек из цементного материала, твердеющего в среде вмещающих пород (известняков детритовых и глинистых).

В испытаниях серий III и IV моделировалось взаимодействие грунтов (известняков детритовых и глинистых) с материалом свай в процессе его твердения в среде вмещающих пород. Такие условия взаимодействия дают существенный прирост структурной связности системы “грунт–материал свай”. Так, уже после твердения раствора с водцементным соотношением В/Ц = 0.85–0.95 обнаруживается значительное повышение величины предельных напряжений сдвига, что наглядно иллюстрирует рис. 5. При этом структурная связность системы возрастает до 31–89 кПа, при сохранении постоянными значений коэффициента трения  $k \approx 0.60$ .

Дальнейшее повышение концентрации вяжущего обуславливает увеличение предельных напряжений сдвига. Закономерности этих изменений были изучены в испытаниях на срез при нормальном к плоскости сдвига давлении  $\sigma = 0.1$  МПа.

В процессе среза развитие относительных деформаций сдвига  $\epsilon$  композитных моделей с разной концентрацией вяжущего характеризуется тремя выраженными этапами (рис. 6). Каждый из них может быть охарактеризован присущими ему значениями модуля деформаций сдвига  $E_{сд}$ :

$$E_{сд} = \Delta\tau / \Delta\epsilon,$$

где  $\Delta\epsilon$  – изменение относительных деформаций сдвига в интервале линейной аппроксимации зависимости от  $\tau$ ;  $\Delta\tau$  – изменение напряжений сдвига в соответствующем интервале, [МПа].

Для наиболее низких концентраций вяжущего ( $V/C = 1.00-0.96$ ) на этапе А происходит мобилизация сил сопротивления сдвигу, накопление деформаций вплоть до предельных, после чего наступает разрушение. Характерный модуль деформаций сдвига составляет 4.1–4.7 МПа.

На этапе Б с концентрациями вяжущего  $V/C = 0.925-0.2$  значения  $E_{сд}$  уменьшаются до 2.1–3.1 МПа. Это связано с перестройкой во времени структуры контакта твердеющего раствора и грунта, закрытием дефектов и микротрещин, возникающих ввиду недостаточной пластификации раствора с повышенной концентрацией вяжущего. Наконец, на этапе В значения  $E_{сд}$  закономерно возрастают (5.0–21.1 МПа) и вписываются в общую закономерность зависимости  $E_{сд} = f(V/C)$  в купе со значениями  $E_{сд}$  этапа А.

Испытания в сериях III и IV показали, что напряжения сдвига при разрушении  $\tau$  закономерно возрастают с увеличением концентраций вяжущего в цементном материале, твердеющем в среде вмещающих пород (рис. 7).

При наибольшей концентрации вяжущего ( $V/C = 0.2$ ) напряжение сдвига в опытах составило 0.74 МПа (кривая 1), но не превышало значений сдвиговой прочности грунтового материала

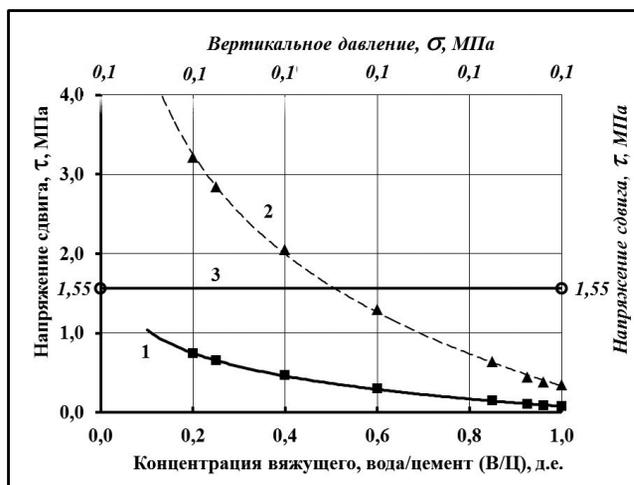


Рис. 7. Диаграммы соотношений относительных деформаций сдвига  $\epsilon$  и напряжений сдвига  $\tau$  при разрушении в зависимости от концентрации вяжущего (1 – данные экспериментов; 2 – прогноз после окончания твердения; 3 – линия предельных напряжений сдвига для известняков при  $\sigma = 0.1$  МПа).

$\tau = 1.55$  МПа (для известняков детритовых и глинистых при той же нагрузке  $\sigma = 0.1$  МПа) (линия 3). Необходимо упомянуть, что, обычно, при анализе оперируют расчетной прочностью, которая достигается после оптимального времени твердения композитной модели. Прогноз расчетной прочности, выполненный на основе таблицы 2 СП 82-101-98 “Приготовление и применение растворов строительных”, показан на рис. 7 кривой 2.

Сопоставление результатов прогноза со сдвиговой прочностью вмещающей породы показывает, что на определенном этапе твердения структурная связность композитной модели “грунт – материал сваи” может превысить прочность породы.

Прогнозируемое достижение композитной моделью прочности известняка возможно уже при водоцементном отношении  $V/C \approx 0.5$ . Таким образом, сдвиговая прочность по боковой поверхности модели сваи в принятых условиях ( $\sigma = 0.1$  МПа) может составить  $\sim 1.55$  МПа при установленном в опытах и упомянутом выше коэффициенте трения  $k \approx 0.60$  (при  $\phi_s = 30^\circ$ ).

Исследования композитных грунтовых систем [8] показывают, что итоговые характеристики определяются сложным сочетанием свойств и соотношения долей компонентов. В рассматриваемых экспериментах вклад составляющих трудно оценить ввиду неопределенности относительно характера и глубины области проникновения вяжущего. В первом приближении, по мере твердения материала в среде вмещающих пород, предельной можно принять наименьшую сдвиговую прочность одного из компонентов.

Концентрация В/Ц	Наименование грунта	Модуль $E_{сд}$ , МПа, в стадии		
		А	Б	В
1	1,0	4,1		
2	0,95	4,7		
3	0,925		2,6	5,0
4	0,85		2,4	6,2
5	0,6		2,2	10,3
6	0,4		2,3	13,2
7	0,25		2,1	19,1
8	0,2		3,1	21,1

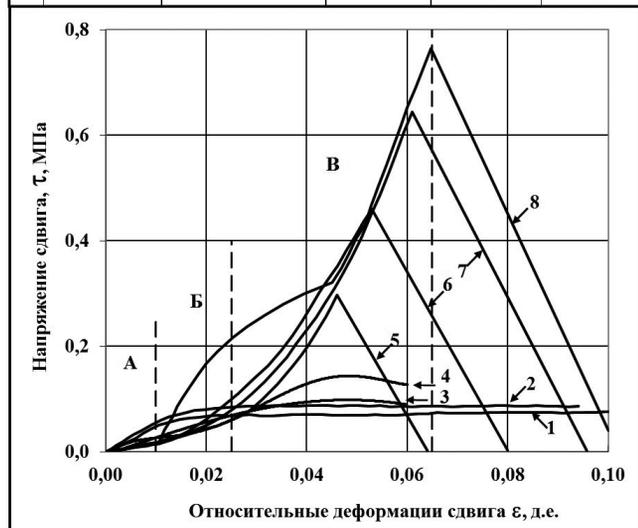


Рис. 6. Диаграммы соотношений относительных деформаций сдвига  $\epsilon$  и напряжений сдвига  $\tau$  в зависимости от концентрации вяжущего.

Более детальное изучение по методикам, описанным в [8], может послужить направлением дальнейших исследований.

В целом, результаты испытаний в сериях I и II подтверждают предположение, согласно которому при совпадении направления плоскости контакта разнородных компонентов с направлением принудительного смещения прочность на срез определяется по слабому слою. В выполненных сериях испытаний маркирующим элементом композитных моделей в сопоставлении параметров прочности послужил материал плашек, коэффициент трения которого составил  $k \approx 0.60$  ( $\varphi_s = 30^\circ$ ).

Формализуя сказанное, для скальных пород и песков, угол трения  $\varphi$  которых заведомо превышает  $30^\circ$ , можно принять сдвиговую прочность  $\tau$ , равной:

$$\tau = 0,60 \cdot \sigma + R_c \quad (1)$$

где  $\sigma$  – давление, нормальное к плоскости сдвига, [МПа];  $R_c$  – наименьшее значение прочности на сжатие или сцепления одного из компонентов, [МПа]; 0.60 – коэффициент трения материала плашек, полученный в экспериментах.

Для пылевато-глинистых грунтов при сдвиге плашек с шероховатой поверхностью параметрами прочности можно принять значения угла, т.н. внутреннего трения, и сцепления, характерные для этих пород и определяемые их составом и физико-химическими особенностями.

Адгезионные характеристики определяют сцепление материала гладкой поверхности свай с водонасыщенными пылевато-глинистыми грунтами и в определенных интервалах значений влажности проявляются как липкость. Трение в этих условиях характеризуется коэффициентами, отражающими физическую сущность грунтов. Для глинистых грунтов, содержащих наиболее тонкие частицы, угол трения составляет  $\varphi_s \approx 22^\circ$ , для песчано-пылеватых  $\sim 26^\circ$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Оценка напряжений сдвига при взаимодействии грунтовых массивов с поверхностью строительных конструкций и инъекционных жил, выполненных из цементного материала, весьма актуальна. В частности, она особенно важна для свайных фундаментов глубокого заложения (более 40 м), расположенных в дисперсных грунтах, а также подчас прорезающих скальные породы. Особенности взаимодействия определяются: материалом и характером поверхности, обводнением, взаимопроникновением материала свай и вмещающих пород.

Для экспериментальных исследований особенностей взаимодействия цементного материала с вмещающими грунтами разработаны специальные методики исследований прочности

на срез композитных моделей “грунт–материал свай”, представляющих собой цементные плашки, контактирующие с грунтом. Методики содержат процедуры подготовки и проведения испытаний на сдвиг по грунту плашек из материала свай с гладкой или шероховатой поверхностью в условиях обводнения. Кроме того, для скальных пород разработана методика подготовки и испытания моделей, в которых твердение раствора с различной концентрацией вяжущего происходило во вмещающем грунте.

Подтверждается, что характеристики прочности композитной модели, имеющей контактную поверхность, совпадающую с направлением сдвига, определяются компонентом, обладающим наименьшими характеристиками.

Результаты испытаний в разных условиях маркируются коэффициентом трения цементных плашек ( $tg\varphi_s = 0.60$  д.е.), который оказался ниже соответствующих значений для песков и скальных пород, и выше – для дисперсных грунтов.

Для скальных пород и песков, угол трения  $\varphi$  которых заведомо превышает  $30^\circ$ , предложено определять сдвиговую прочность  $\tau$  по ф. (1), в которой  $\sigma$  моделирует давление на соответствующей глубине прорезаемой толщи, величина прочности на сжатие  $R_c$  – соответствует контактному сцеплению  $C$  при  $\sigma = 0$ , а коэффициент трения материала  $tg\varphi_s$  составляет 0.60 д.е.

Анализ значений контактного сцепления показал, что для дисперсных пылевато-глинистых грунтов, при сдвиге шероховатых плашек реализуются когезионные, т.е. значения, т.н. угла внутреннего трения, и сцепления, характерные для этих пород и определяемые их составом и физико-химическими особенностями.

Для гладкой поверхности свай возможны адгезионные условия взаимодействия, которые в определенных интервалах значений влажности проявляются как липкость. Углы трения, полученные для гладких поверхностей плашек и отражающие физическую сущность трения частиц, слагающих грунты, составляют для глин  $\varphi_s \approx 22^\circ$ , для песчано-пылеватых грунтов  $\sim 26^\circ$ .

При сдвиговых испытаниях моделей, цементный материал которых твердеет во вмещающем грунте, выделены 3 этапа развития деформаций сдвига в зависимости от концентрации вяжущего. При этом промежуточный этап Б, очевидно, связан с закрытием дефектов и микротрещин, возникающих ввиду недостаточной пластификации раствора с повышенной концентрацией вяжущего. Этот этап важно учитывать при испытаниях свай, изготавливаемых в грунтовом массиве.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Деркач В.Н. Прочность касательного сцепления цементных растворов в каменной кладке. // Инженерно-строительный журнал. 2012. № 3. С. 19–28.
2. Кутергин В.Н., Афонин А.П., Кальберген Р.Г. Комплексные исследования свойств грунтов оснований высотных сооружений // Уникальные и специальные технологии в строительстве. М.: ИГЭ РАН, 2006. № 1(4). С. 78–83.
3. Кутергин В.Н., Фролов С.И. Специальные лабораторные исследования свойств грунтов // Промышленное и гражданское строительство. 2003. № 10. С. 19–21.
4. Петрухин В.П., Шулятьев О.А. Геотехнические особенности проектирования и строительства высотных зданий в Москве // Рос. архит.-строит. энцикл. Т. XIII. Строительство высотных сооружений. М.: ФГУП “ВНИИТПИ”, 2010. С. 360–378.
5. Петрухин В.П., Шулятьев О.А., Мозгачева О.А. Научно-техническое сопровождение геотехнического проектирования и строительства высотных зданий. Мониторинг // Рос. архит.-строит. энцикл. Т. XIII. Строительство высотных сооружений. М.: ФГУП “ВНИИТПИ”, 2010. С. 336–360.
6. Рекомендации по определению липкости грунтов в стационарных лабораториях и полевых условиях. ПНИИС Госстроя СССР. М.: Стройиздат, 1983. 32 с.
7. Шулятьев О.А. Фундаменты высотных зданий // Вестник ПНИПУ Строительство и архитектура. 2014. № 4. С. 202–244.
8. Kutergin V.N., Kal'bergenov R.G., Karpenko F.S., Merzlyakov V.P. Deformation properties of the “voskresensky shale” composite series // Soil Mechanics and Foundation Engineering. 2016. Т. 52. № 6. P. 335–342.

## ASSESSING INTERACTION BETWEEN THE COMPONENTS IN THE SOIL–CEMENT COMPOSITE MODEL

V. N. Kutergin<sup>a, #</sup>, F. S. Karpenko<sup>a</sup>, S. I. Frolov<sup>a</sup>

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

<sup>#</sup>*E-mail: kvan20@bk.ru*

Soil massifs have close contact with foundations, piles, enclosing and fixing structures (anchors, dowels, retaining walls), as well as reinforcing soil during grouting with injection veins. Many bodies are composed of hardening cement that has an interfacial boundary with the soil. The soil–material system can be considered as a composite, in which the components exhibit new qualities when interacting. Experimental studies of cement interaction with enclosing fine soil and hard rock have been performed. The interaction specifics controlled by the material, the concentration of the binder, the surface type, watering, as well as mutual penetration of cement and enclosing rocks are studied. Special methods of shear testing based on soil samples of pile models made of cement material have been developed. The results of studying the effect of smooth and rough surfaces upon waterlogging are presented; the values of friction coefficients, contact cohesion, and stickiness are given. A dependence is proposed for determining the limit shear stresses of composite models upon the contact between sands and hard rocks with the material of dies. For rocks in which the hardening of the pile material was modeled, the values of the limit stresses and shear strain modulus were obtained depending on the binder concentration in the cement mortar.

**Keywords:** soils, cement material, piles, composite model, shear strength, coefficient of friction, contact cohesion, stickiness, binder concentration

## REFERENCES

1. Derkach, V.N. [Tangential cohesion strength of cement mortars in masonry]. *Inzhenerno-stroitel'nyi zhurnal*, 2012, no. 3, pp. 19–28. (in Russian)
2. Kutergin, V.N., Afonin, A.P., Kal'bergenov, R.G. [Comprehensive studies of ground properties in the foundations of high-rise structures]. *Unikal'nye i spetsial'nye tekhnologii v stroitel'stve*. Moscow, IEG RAS, 2006, no. 1(4), pp. 78–83. (in Russian)
3. Kutergin, V.N., Frolov, S.I. [Special laboratory studies of soil properties]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*, 2003, no. 10, pp. 19–21. (in Russian)
4. Petrukhin, V.P., Shulyat'ev, O.A. [Geotechnical features of the design and construction of high-rise buildings in Moscow]. In: [Russian architectural and building encyclopedia, vol. XIII. Construction of high-rise buildings]. Moscow, VNIINTPI Publ., 2010, pp. 360–378. (in Russian)
5. Petrukhin, V.P., Shulyat'ev, O.A., Mozgacheva, O.A. [Scientific and technical support for geotechnical design and construction of high-rise buildings. Monitoring]. In: [Russian architectural and building encyclopedia, vol. XIII. Construction of high-rise buildings]. Moscow, VNIINTPI Publ., 2010, pp. 336–360. (in Russian)
6. [Recommendations for determining the stickiness of soils in stationary laboratories and field conditions]. PNIIS Gosstroy USSR. Moscow, Stroyizdat Publ., 1983, 32 p. (in Russian)
7. Shulyat'ev, O.A. [Foundations of high-rise buildings]. *Vestnik PNIPU Stroitel'stvo i arkhitektura*, 2014, no. 4, pp. 202–244. (in Russian)
8. Kutergin, V.N., Kal'bergenov, R.G., Karpenko, F.S., Merzlyakov, V.P. Deformation properties of the “voskresensky shale” composite series. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2016, vol. 52, no.6, pp. 335–342. (in Russian)

## ЗАГРЯЗНЕНИЕ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

УДК 504.4.054

## ЭКОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА СИСТЕМЫ “ВОДОТОК И ЕГО ВОДОСБОР” МАЛОЙ Р. ПОЛЕЖАЕВКА (БАССЕЙН Р. АМУР)

© 2024 г. Л. А. Гаретова<sup>1,\*</sup>, Е. Л. Имранова<sup>1</sup>, Н. К. Фишер<sup>1</sup>, А. М. Кошельков<sup>2</sup><sup>1</sup>Институт водных и экологических проблем ДВО РАН,  
ул. Дикопольцева 56, Хабаровск, 680000 Россия<sup>2</sup>Институт горного дела ДВО РАН, ул. Тургенева 51, Хабаровск, 680000 Россия

\*E-mail: gar-va1948@mail.ru

Поступила в редакцию 13.03.2024 г.

После доработки 21.08.2024 г.

Принята к публикации 09.09.2024 г.

Представлены данные о содержании растворенных веществ,  $C_{орг}$ , углеводов, фенолов, токсичных металлов и мышьяка в воде, донных отложениях и почве водосбора малой городской р. Полежаевка (г. Хабаровск). Выявлена положительная зависимость между содержанием  $C_{орг}$  и фракцией частиц размером 0.01 мм в почве. По вертикальному профилю почвы снижение  $C_{орг}$  сопровождалось увеличением содержания металлов (кадмий, медь, никель, ртуть, свинец, цинк) и мышьяка. Углеводы в воде не превышали 0.18 мг/дм<sup>3</sup> (3.6 ПДК<sub>р.х.</sub>), в донных отложениях находились в границах допустимой углеводородной перегрузки самоочищающей способности  $C_{ув}/C_{орг} = 0.07–0.43$ , в почве – не превышали 141.6 мг/кг. Коэффициент донной аккумуляции по показателям железа, марганца, свинца и цинка характеризуется как “поступление в водный объект свежего загрязнения”. Полученные сведения полезны при оценке геохимических последствий затопления поймы малых рек и при планировании мероприятий по ревитализации городских малых рек.

**Ключевые слова:** малая река, урбанизированные территории, донные отложения, почва, органический углерод, углеводороды, металлы, мышьяк

DOI: 10.31857/S0869780924060072 EDN: ALTKKF

## ВВЕДЕНИЕ

Малые реки составляют 99% всех естественных водотоков России [27]. Только на территории г. Хабаровск и его пригородов насчитывается более 20 малых рек. Главная особенность формирования стока малых рек — их очень тесная связь с ландшафтом бассейна, что и обуславливает их уязвимость при чрезмерном использовании не только водных ресурсов, но и водосбора. Они выполняют функции регулятора водного режима ландшафтов, поддерживая равновесие и перераспределение влаги. Малые реки урбанизированных территорий обладают ограниченными регенерирующими возможностями, они наиболее подвержены воздействию хозяйственной деятельности по сравнению с крупными реками [36, 39]. В результате постоянно возрастающей антропогенной нагрузки состояние малых рек урбанизированных территорий не только России, но и всего мира оценивается, как катастрофическое. Многие малые реки Хабаровска утратили черты природных водных объектов и превратились в коллекторы сточных вод. Уровни загрязненности вод характеризовались в разные годы как “умеренно загрязненные”, “загрязненные” и “грязные” (3, 4 и 5 классы качества) [6, 26].

Распространено мнение, что, в ближайшие годы большая часть загрязняющих веществ (ЗВ) будет поступать в поверхностные воды не от стационарных точечных источников, а в результате смыва с поверхности водоразделов и с территорий крупных городов с ливневым стоком. Поверхностные стоки способны внести в водные объекты до 99% загрязнений. По расчетам из общего количества ЗВ, содержащихся во всех видах сточных вод, отводимых с территории города, на долю поверхностного стока в настоящее время приходится: около 78% взвешенных веществ, 20% органических веществ (по БПК) и 68% нефтепродуктов [11].

В руслах малых городских рек и их поймах (если они еще сохранились) происходит накопление нефтепродуктов, фенолов, тяжелых металлов, а также соединений меди, марганца, железа [21, 25, 30, 32, 33]. Металлы в природной среде, а особенно в донных осадках, пребывают в постоянной миграции, которая может реализовываться как в механической форме (вместе со слагающими осадок частицами), так и в растворенной и коллоидальной форме, причем при этом происходит непрерывающийся взаимообмен между гидросферой и литосферой через одну из известнейших геохимических барьерных зон “дно — вода”.

В естественных водоемах большая часть тяжелых металлов попадает в донные отложения (ДО) [35]. Сорбция тяжелых металлов донными отложениями зависит от особенностей их состава и содержания органических веществ (ОВ).

В последнее десятилетие интерес к малым водотокам Дальнего Востока обусловлен не только усилением антропогенного пресса [4, 16, 18], но и специфическим гидрологическим режимом бассейна р. Амур [7, 12, 15, 26, 28, 29]. В отличие от рек европейской части России, где основной причиной эвтрофирования малых рек является маловодность, основная особенность водного режима бассейна Амура — паводки и наводнения, которые в последнее десятилетие носят регулярный характер и в большинстве случаев имеют “опасный” или как в 2013 г. “катастрофический” уровень водности [15]. Длительность затопления паводковыми водами пойменных почв определяет преобладание либо окислительных (кратковременное затопление поймы), либо окислительно-восстановительных (долгопоемный режим). Повышенная обводненность речных пойм создает своеобразную геохимическую обстановку, при которой значительно возрастает подвижность химических элементов и соединений [3].

С эмпирической точки зрения система “водоток и его водосбор”, включающая русла загрязненных малых рек и прилегающую к ним почву, представляет собой своеобразную природную лабораторию, позволяющую изучать физико-химические, биогеохимические, продукционно-деструкционные, миграционные и другие аспекты преобразования антропогенно измененных водосборов. Такие сведения крайне важны для понимания сущности процессов трансформации природных и антропогенных экосистем и служат основой для оценки перспектив реабилитации водосборов малых городских рек. Для принятия технических решений по ревитализации водосборов городских рек требуется комплексное изучение признаков, характеризующих качественное их состояние, потенциальную возможность экосистем к самоочищению в условиях техногенного воздействия.

Цель исследования — выявить особенности распределения  $S_{орг}$ , углеводов (УВ), металлов и мышьяка между водой, ДО и почвой в системе “водоток и его водосбор” малой реки.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Река Полежаевка берет начало в оврагах северо-восточной части г. Хабаровск и, протекая в юго-восточном направлении, сливается с р. Гнилая Падь в 2 км от ее впадения в р. Чёрная. Общая протяженность водотока составляет менее 10 км, ширина русла 1.0–1.5 м; площадь водосбора реки составляет 6.4 км<sup>2</sup>. На всем протяжении водоток заилен, берега покрыты разнотравьем. Природный

микрорельеф района исследования изменен в результате сельскохозяйственного и мелиоративного освоения. Южнее с. Тополево ранее для полива теплиц была оборудована сеть мелиоративных каналов, вытекающих из запруженного дамбой пруда на р. Полежаевка. В настоящее время пруд спущен, его стоки заилены, деградированы, большинство орошаемых ими земель уже не используются для сельскохозяйственного назначения. На участке среднего течения (створ 4) в реку поступают неконтролируемые хозяйственные стоки с. Тополево. Схема района исследования с пунктами отбора проб воды, ДО и почвы представлена на рис. 1.

Исследования воды, ДО и почвы проводили в период осенней межени (первая декада октября 2022 г.). Пробы речной воды отбирались с глубины ~10 см, объем проб составлял  $\geq 2$  л. Пробы ДО отбирали пробоотборником (буром) “Burkle” из слоя 0–10 см. Образцы почвы отбирали из слоев 0–20 и 20–80 см в пределах водоохранной зоны (расстояние от русла не более 50 м). Определенные рН, минерализации (М) и удельной электропроводности (УЭП) воды и водной вытяжки из ДО и почвы (соотношение 1 : 5) проводили с помощью измерителя комбинированного Seven Multi S-47k (Mettler-Toledo, Швейцария). Гранулометрический состав ДО и содержание фракции 0.01 мм в почве определяли согласно [8]. Концентрацию  $S_{орг}$  в образцах ДО и почвы определяли фотометрическим методом после окисления ОВ в ДО сульфохромной смесью [9], измерения проводили на спектрофотометре Спекол-1.

Определение содержания УВ выполняли по методике [19], измерения проводили на концентратометре КН-2М (Сибэкоприбор, Россия). Массовую долю летучих фенолов определяли согласно [20] с помощью спектрофотометра В-1200 (Shanghai Instruments Co., Ltd Китай).

Анализы металлов и мышьяка выполняли ФГБУ ЦАС “Хабаровский”. Определение их массовой доли в пробах воды, ДО и почвы проводили на атомно-абсорбционном спектрофотометре (ААС) Agilent 720 JCP-OES (Agilent Technologies, США), ртути на ААС Квант-2АТ, (ООО Кортек, Россия) посредством метода, основанного на минерализации образцов способом сухого озоления и определения концентрации элемента в растворе минерализата методом пламенной атомной абсорбции.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

### *Физико-химические параметры воды, донных отложений и почв*

Величина рН воды варьировала от 7.66 до 8.55, с выраженной тенденцией увеличения от верхнего к нижним створам (табл. 1). Содержание растворенных веществ в воде по интегральному показателю удельной электропроводности

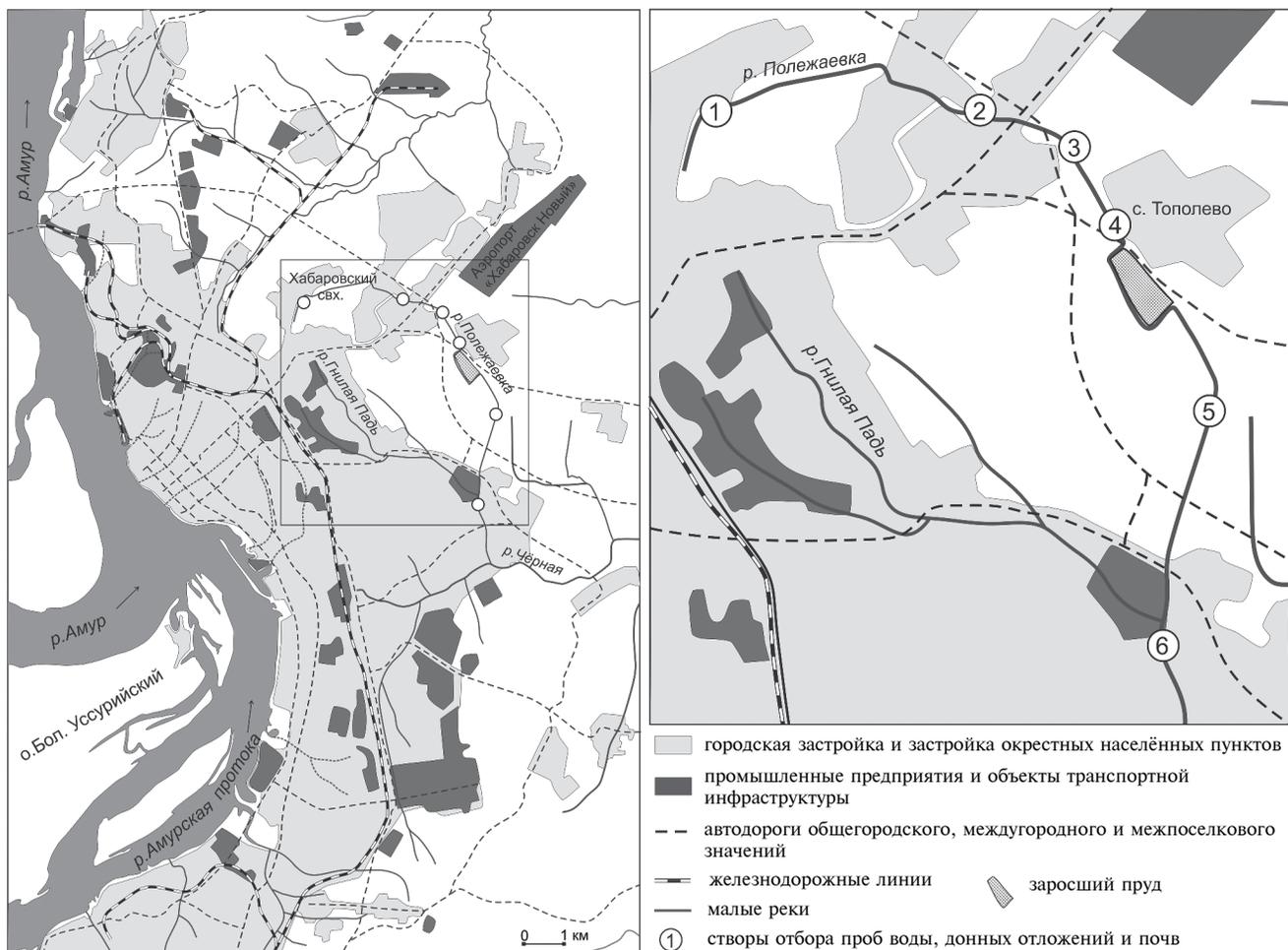


Рис. 1. Карта-схема района исследований.

(УЭП) варьировало от 289 до 396 мкс/см, соответственно изменялась величина минерализации – от 144.5 до 197.7 мг/дм<sup>3</sup> при минимальном значении в 4 створе и максимальном в 1 верхнем створе. Следует отметить, что показатели содержания растворенных веществ (УЭП, минерализация) в воде превышали таковые в ДО в 1.4, в почве в 2.8 раза. Превышение содержания фенолов было незначительно – 1.1 ПДК, и выявлено в единичном случае (4 створ). Превышение содержания нефтепродуктов зафиксировано в воде створов 4 и 5 и составило 3.6 и 1.2 ПДК соответственно.

Мощность слоя ДО на разных участках Полежаевки неоднородна и зависит от морфометрии участка и гидрологических характеристик водотока. В створах с широким руслом, характеризующихся замедленным течением реки, в ДО повышается доля мелкодисперсных фракций (рис. 2). Доминируют в последнем случае частицы размером 0.1–0.01 мм, составляющие до 68% в составе ДО. Доля физической глины (<0.002 мм) в образцах ДО не превышает 4.18%.

Величина pH водной вытяжки из ДО была в пределах нейтральной – от 6.3 до 7.5 (табл. 2).

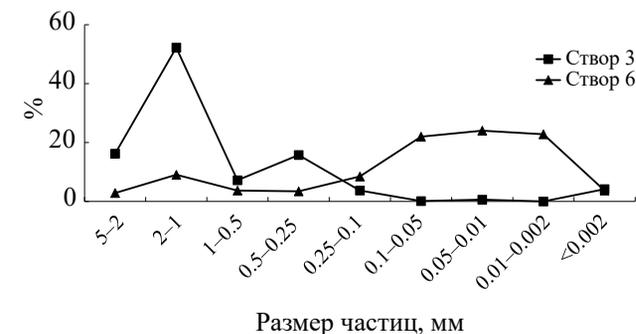


Рис. 2. Основные типы распределения гранулометрического состава ДО р. Полежаевка.

Максимальные величины УЭП и минерализации водной вытяжки были выявлены в илах створов 2 и 5. Количество  $S_{орг}$  в ДО изменялось от 4.04 до 9.09% (среднее 5.95%) при минимальном содержании в осадках 4 створа и максимальном в ДО 2 створа. Содержание УВ варьировало в пределах одного порядка – от 39.9 до 429.7 мг/кг при максимальном содержании в ДО верхнего 1 створа. Доля углерода, входящего в состав УВ ( $S_{УВ}$ ) в общем содержании  $S_{орг}$  варьировало от 0.07 до 0.43%,

Таблица 1. Гидрохимические показатели воды р. Полежаевка

Показатели	Ед. изм.	Створ						Норматив*
		1	2	3	4	5	6	
Водородный показатель	pH	7.66 ± 0.2	7.83 ± 0.2	7.83 ± 0.2	7.93 ± 0.2	8.55 ± 0.2	8.3 ± 0.2	—
Минерализация	мг/дм <sup>3</sup>	197.7 ± 0.5	160.5 ± 0.5	160.3 ± 0.5	144.5 ± 0.3	161.2 ± 0.5	155.85 ± 0.4	—
УЭП	мКС/см	396 ± 1.0	321 ± 1.0	320 ± 1.0	289 ± 1.0	322 ± 1.0	312 ± 1.0	—
Фенолы летучие, сумма	мг/дм <sup>3</sup>	<0.0005	<0.0005	<0.0005	0.0011 ± 0.0005	0.0007 ± 0.0003	<0.0005	0.001
Нефтепродукты	мг/дм <sup>3</sup>	0.03 ± 0.01	0.03 ± 0.01	0.03 ± 0.01	0.18 ± 0.06	0.06 ± 0.02	0.04 ± 0.01	0.05

\* СанПиН 1.2.3685-21

при максимуме в ДО 4 створа, подверженному влиянию стоков с. Тополево. Условной границей допустимой перегрузки самоочищающей способности (Р) принята величина  $C_{УВ}/C_{орг} = 0.26\%$ , а высокой перегрузки – величина  $P > 0.5\%$  [13], т.е. по содержанию УВ исследованные ДО находятся в границах допустимой углеводородной перегрузки. Распределение концентраций фенолов имело неравномерный характер: максимальные концентрации выявлены в осадках 4 створа, минимальное – в нижнем 6 створе, при среднем значении 0.27 мг/кг. Влияние неконтролируемых коммунально-бытовых стоков с. Тополево проявляется в увеличении содержания в ДО УВ и фенолов ниже участка их сброса (створ 4) по сравнению с вышележащими створами.

Величина pH водной вытяжки из образцов почвы, отобранных с глубины 0–0.2 м изменялась от слабокислой до нейтральной – 5.55–7.10 (см. табл. 2). Минерализация была невысокой от 36.5 до 82.3 мг/л и закономерно изменялась в соответствии с величиной УЭП. Содержание  $C_{орг}$  колебалось от 4.67 в образце 4П до 11.04% в образце 5П при среднем значении 8.14%. Содержание ОВ связано с мелкодисперсной (0.01 мм) фракцией почвы ( $r = 0.86$ ) (рис. 3). В слое почвы 0–0.2 м частицы размером 0.01 мм составляли от 7.7 до 13.1%, в слое 0.2–0.8 м их количество снижалось и составляло от 4.3 до 7.9%. В нижнем горизонте почвы (0.2–0.8 м) содержание  $C_{орг}$  существенно снижалось (от 3.5 до 14 раз). Содержание УВ в почве изменялось от величины <5.0 до 141.6 мг/кг и в целом было значительно ниже, чем в ДО, соответствующим образом снижалась и доля УВ в общем количестве  $C_{орг}$  в почве (см. табл. 2).

Максимальное содержание УВ в почве выявлено на 2 створе, минимальное – на 6 створе. В целом содержание УВ в исследованной почве было значительно ниже, чем в ДО реки. Следует отметить, что проблема определения ПДК нефтяных УВ как для почв, так и для ДО практически не решена. Поэтому предложено оценивать степень нефтяного загрязнения почв по превышению содержания нефтепродуктов над фоновым значением

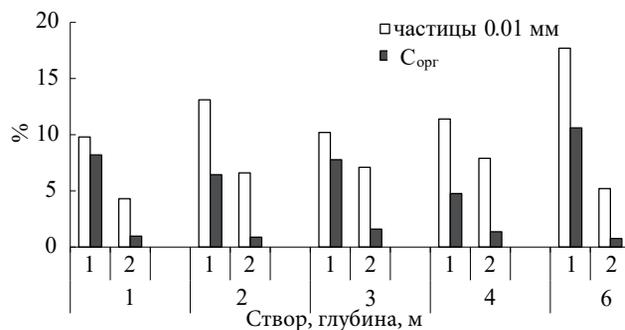


Рис. 3. Распределение частиц почвы размером 0.01 мм и  $C_{орг}$  в почвенном горизонте: 1 – 0–0.2 м, 2 – 0.2–0.8 м.

Таблица 2. Характеристика ДО и почвы водосбора р. Полежаевка

Створ	Описание в естественном состоянии	Водная вытяжка			Сухой образец			
		рН	УЭП, мкСм/см	М, мг/л	С <sub>орг</sub> *, %	УВ, мг/кг	С <sub>ув</sub> */С <sub>орг</sub> *, %	Массовая доля летучих фенолов, мг/кг
Донные отложения								
1	Темно-серый ил с включением растительных остатков	7.19 ± 0.1	278.0 ± 1.0	139.0 ± 1.2	5.35 ± 0.5	429.7 ± 28.9	0.70	0.24 ± 0.05
2	Темно-серый ил с включением гравия и растительных остатков	6.82 ± 0.1	312.0 ± 1.0	155.9 ± 1.5	9.09 ± 0.8	89.5 ± 5.8	0.09	0.26 ± 0.05
3	Серый песчанистый ил с включением гравия и крупного песка	6.67 ± 0.1	126.7 ± 1.0	63.4 ± 1.1	5.12 ± 0.5	39.9 ± 1.0	0.07	0.31 ± 0.06
4	Серый песчанистый ил с включением растительных остатков	7.50 ± 0.1	235.0 ± 1.0	117.5 ± 1.4	4.04 ± 0.3	199.3 ± 5.8	0.43	0.51 ± 0.10
5	Черный пастообразный ил с включением растительных остатков	6.85 ± 0.1	314.0 ± 1.0	156.9 ± 1.5	6.65 ± 0.5	95.7 ± 3.3	0.13	0.32 ± 0.06
6	Серый ил с включением охристой и серой глины, с растительными остатками	6.30 ± 0.1	92.2 ± 1.0	46.2 ± 1.0	5.50 ± 0.5	161.1 ± 8.9	0.25	0.11 ± 0.03
Почва								
1	Светло-коричневая почва, тяжелая глина, плотная, пронизана корнями	6.98 ± 0.1	117.2 ± 1.0	58.6 ± 1.1	8.20 ± 0.7	74.0 ± 3.7	0.08	0.18 ± 0.07
2	Почва коричневого цвета, комковато-порочестой структуры, с обилием корней и растительных остатков	7.10 ± 0.1	164.7 ± 1.0	82.3 ± 1.2	6.44 ± 0.5	141.6 ± 7.4	0.19	0.17 ± 0.07
3	Серо-бурая почва с пятнами тяжелой глины, пронизана корнями	5.55 ± 0.1	80.4 ± 1.0	40.3 ± 1.0	7.77 ± 0.7	11.3 ± 1.7	0.01	0.29 ± 0.08
4	Светло-коричневая, среднесуглинистая почва, пронизана корнями	5.67 ± 0.1	73.0 ± 1.0	36.5 ± 1.0	4.76 ± 0.5	11.7 ± 1.3	0.02	0.08 ± 0.01
5	Бурая почва комковатой структуры, много корней и растительных остатков разной степени разложения	6.67 ± 0.1	116.3 ± 1.0	58.1 ± 1.1	11.04 ± 0.7	6.4 ± 0.7	0.005	0.17 ± 0.07
6	Бурая почва комковатой структуры, много корней и растительных остатков разной степени разложения	6.15 ± 0.1	156.6 ± 1.0	78.3 ± 1.2	10.61 ± 0.6	<5.0	0.004	0.12 ± 0.03

\* Для пересчета концентраций УВ на содержание углерода (С<sub>ув</sub>) использовали коэффициент 0.867 [10]

**Таблица 3.** Содержание металлов и мышьяка в воде, ДО и почве водосбора р. Полежаевка

Компонент	Вода, мг/дм <sup>3</sup>	Донные отложения, мг/кг	Почва, мг/кг
Кадмий	$\frac{0.0001-0.01^*}{0.0005}$	$\frac{0.46-1.0}{0.73}$	$\frac{0.10-0.87}{0.53}$
Медь	$\frac{0.002-0.01}{0.007}$	$\frac{14.05-24.0}{19.03}$	$\frac{13.58-93.7}{25.86}$
Мышьяк	$\frac{0.002-0.005}{0.004}$	$\frac{5.9-10.5}{8.2}$	$\frac{2.00-14.50}{5.93}$
Никель	$\frac{0.001-0.01}{0.004}$	$\frac{10.54-30.9}{20.72}$	$\frac{8.44-44.1}{21.45}$
Ртуть	$\frac{0.0001-0.0001}{0.0001}$	$\frac{0.046-0.064}{0.055}$	$\frac{0.021-0.076}{0.066}$
Свинец	$\frac{0.001-0.005}{0.002}$	$\frac{18.13-62.10}{40.11}$	$\frac{8.61-71.60}{33.45}$
Цинк	$\frac{0.004-0.05}{0.02}$	$\frac{70.21-359.70}{214.96}$	$\frac{24.3-193.8}{118.15}$

\* В числителе – пределы варьирования, в знаменателе – медианные значения.

в конкретном районе и на конкретной территории [23]. При этом, в частности, указано, что для районов, не ведущих добычу нефти, фоновое содержание нефтяных УВ в почве составляет 40 мг/кг, а для нефтедобывающих районов – 100 мг/кг. При допущении, что на урбанизированных территориях нефтяные УВ являются приоритетными видами загрязнения, за фоновые значения мы приняли их содержание 100 мг/кг [17]. Согласно данной градации единичное превышение фонового значения в почве составляло не более 1.4 раза. Содержание фенолов в почве составило от 0.08 до 0.29 мг/кг (в среднем 0.17 мг/кг), что ниже, чем среднее значение для ДО.

Сравнительная оценка уровня углеводородного загрязнения почв и ДО р. Полежаевка и других малых рек Хабаровска (Лесопилка, Чердымовка, Курча-Мурча) [5, 12], показала, что в ДО Полежаевки даже максимальное (429.7 мг/кг) количество УВ на 1–2 порядка ниже, чем в упомянутых водных объектах, где содержание УВ составляло от 5070 до 22540 мг/кг. Такая же картина наблюдалась и для почвы водосбора Полежаевки, где не только среднее, но и максимальное содержание (141.5 мг/кг) было ниже на 2 порядка, чем в почвах водосбора р. Курча-Мурча.

#### *Металлы и мышьяк*

Содержание железа в воде составляло 0.32–2.0 мг/дм<sup>3</sup> и превышало уровень ПДК<sub>р.х.</sub> от 3.2 до 20 раз, количество марганца колебалось от 0.005 до 1.37 мг/дм<sup>3</sup> с превышением от 7.2 до 137 ПДК<sub>р.х.</sub> Высокие концентрации железа и марганца

характерны для поверхностных и подземных вод бассейна р. Амур, особенно это заметно в осенний и зимний периоды при увеличении доли грунтового питания в водных объектах [14]. В ДО происходит их аккумуляция, и количество железа достигает 5000, а марганца – 136 мг/кг. Их распределение в ДО носит неравномерный характер, максимальное содержание Fe и Mn выявлено в осадках застойного участка реки (4 створ). Содержание высокоопасных компонентов: кадмия, меди, мышьяка, никеля, ртути, свинца и цинка в воде, ДО и почве водосбора р. Полежаевка, представлено в табл. 3. В воде их концентрации были на уровне или ниже значений ПДК<sub>р.х.</sub>. Повышенное содержание цинка отмечено и в ДО, и в почве, где превышение ОДК составляло 1.95 и 1.49 раз соответственно. Мышьяк в большей степени аккумулятивен в ДО, его максимальное содержание 10.2 мг/кг (2 ОДК) выявлено в осадках реки, отобранных ниже бывшей дамбы (6 створ). Вероятно, повышенное по сравнению с почвой содержание мышьяка в ДО обусловлено не только природным фоном, но и влиянием хозяйственных стоков с Тополево.

Усилению миграции металлов и металлоидов из почвы в водную среду и их абсорбции в ДО способствует регулярное переувлажнение почвы водосбора [3], что типично для условий муссонного климата бассейна р. Амур и периодических наводнений. Переувлажнение почвы водосбора реки также обусловлено интенсивным заилением участков ее нижнего течения (створы 4, 5, 6), что способствует регулярным паводкам с затоплением ее поймы.

Во время увлажнения почвы восстановительные условия способствуют подвижности мышьяка за счет прямой редукции пятивалентного мышьяка в более токсичный трехвалентный [31, 34]. Активными редуктантами многих металлов и мышьяка являются соединения железа, что способствует их подвижности. В значительной степени цинк закрепляется (гидр)оксидами железа и фосфатами [2, 37]. Также в условиях переувлажнения при низком редокс-потенциале роль активных фаз-носителей действительно опасных тяжелых металлов: кобальта, никеля, бария, выполняют оксиды марганца, способствующие закреплению опасных тяжелых элементов в почве [1, 38]. Свинец прочно связан с органическим веществом ДО и почв, что объясняется его сродством со структурой гуминовых кислот и отличается от других тяжелых металлов [38].

По профилю почвы распределение металлов и мышьяка имело свои особенности. Если содержание  $C_{орг}$  и мелкодисперсной фракции в нижнем горизонте почвы закономерно снижалось, то распределение металлов и мышьяка носило обратный характер – увеличивалось с увеличением глубины профиля (рис. 4). Снижение содержания металлов и мышьяка в верхнем горизонте почвы может быть обусловлено их вымыванием из верхнего горизонта за счет поверхностного стока в русло реки, а также вследствие эрозии и потребления растениями.

В целом распределение концентраций металлов в компонентах системы “водоток и его водосбор” показывает тенденцию переноса веществ из компонентов ландшафта (почвы) в водоток. При этом в ДО происходит значительное, по сравнению с почвой накопление кадмия, мышьяка, свинца и цинка, что согласуется с результатами исследования других авторов [24].

Для оценки состояния водного объекта по загрязненности ДО использовался коэффициент донной аккумуляции (КДА), который рассчитывают для каждого вещества по формуле:

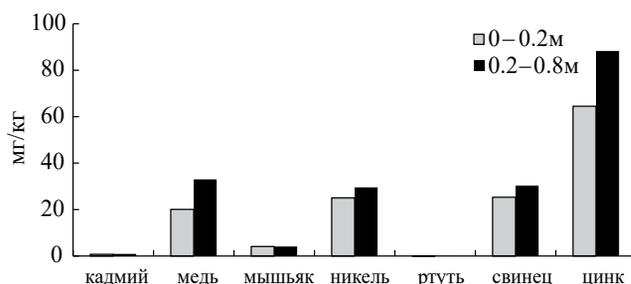


Рис. 4. Среднее содержание металлов и мышьяка в почве.

$КДА = C_1/C_2$  [22]. Использовали средние значения для каждого компонента (табл. 4). Коэффициенты донной аккумуляции железа, марганца и свинца характеризуют состояние как “поступление в водный объект свежего загрязнения”. По остальным исследуемым показателям в ДО, в том числе нефтепродуктам, экологическая обстановка водного объекта определена как “относительно удовлетворительная”.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сходство величин геохимических характеристик воды, ДО и почв системы “водоток и его водосбор” отражает влияние:

- климатических условий – мусонные дожди, паводки, способствующие стоку терригенного материала в русло реки;
- гидрологического режима – слабая проточность реки в меженный период;
- антропогенных факторов – поступление неконтролируемых стоков с. Тополево, разрушение дамбы пруда, в результате чего произошло обмеление реки и частичная трансформация дна реки в почвенное пространство.

Формирование химического состава воды р. Полежаевка происходит за счет поступления различных веществ с поверхностным стоком

Таблица 4. Коэффициент донной аккумуляции р. Полежаевка

Характеристика	Загрязняющие вещества									
	НП	Cd	Cu	As	Ni	Fe	Mn	Hg	Pb	Zn
Концентрация ЗВ в донных отложениях, $(C_1)$ , мкг/г	169.2	0.73	19.03	8.2	20.7	5000	136.0	0.055	40.1	215.0
Концентрация ЗВ в воде, $(C_2)$ , мкг/дм <sup>3</sup>	62	0.5	7.0	4.0	4.0	320	5.0	0.1	2.0	2.0
КДА	2.73	1.46	2.71	2.1	5.2	15.6	27.2	0.005	20.1	107.5
Экологическая обстановка по КДА	ОУ	ОУ	ОУ	ОУ	ОУ	ПЗ	ПЗ	ОУ	ПЗ	ПЗ

Примечание: ОУ (1–9) – относительно удовлетворительная, ПЗ (10–999) – поступление в водный объект свежего загрязнения, ВУ (1000–9999) – высокий уровень хронического загрязнения.

и в результате выщелачивания выстилающих долину осадочных пород. На это указывает величина интегрального показателя содержания растворенных веществ (УЭП), которая в воде выше, чем в ДО в 1.4, а в почве в 2.8 раза, а также идентичность качественного состава микроэлементов (металлы и мышьяк) в воде, ДО и почве. На участке нижнего течения определен вклад вносят нефтепродукты и фенолы, поступающие со стоками с. Тополево.

Донные отложения малой реки наследуют геохимические свойства почв и находятся в постоянном взаимодействии за счет поверхностного стока и регулярных паводков. Перераспределение мелкодисперсных фракций в ДО зависит от гидрологических условий участка реки (ширина русла, скорость течения). Доля частиц размером 0.01 мм в гранулометрическом составе ДО в среднем составляет 10.4%, в почве – 11.7%, что обуславливает относительно высокие концентрации  $C_{орг}$  в ДО (среднее 5.95%) и почве (среднее 8.1%).

В ДО происходит значительное, по сравнению с верхним горизонтом почвы накопление кадмия, мышьяка, свинца и цинка. Коэффициент донной аккумуляции по показателям, железа, марганца, свинца и цинка характеризуется как “поступление в водный объект свежего загрязнения”. Несмотря на относительно невысокие концентрации индивидуальных металлов и мышьяка в ДО, сочетание данных компонентов с высоким содержанием  $C_{орг}$  при регулярном их поступлении в р. Полежаевка создает условия для формирования в русле реки техногенных илов. Этому способствуют благоприятные геоморфологические условия в нижнем течении реки (расширение речной долины, формирование широкого пойменного русла, низкая скорость течения, понижение ее нижнего участка за счет стока пруда из-за разрушения дамбы).

Включение данного водотока в программу по рекультивации малых городских рек будет своевременным шагом, что будет способствовать его возвращению в систему городской рекреации.

*Авторы выражают благодарность в.н.с. М.И. Климину (ИВЭП ДВО РАН) за помощь в выполнении анализов.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Водяницкий Ю.Н.* Оксиды марганца в почвах. М.: Почв. ин-т им. Докучаева, 2005. 95 с.
2. *Водяницкий Ю.Н.* Тяжелые и сверхтяжелые металлы и металлоиды в загрязненных почвах. М.: Почв. ин-т им. Докучаева, 2009. 182 с.
3. *Водяницкий Ю.Н., Ладонин Д.В., Савичев А.Т.* Загрязнение почв тяжелыми металлами. М.: МГУ, 2012. 304 с.
4. *Вишкова Т.С., Никулина Т.В., Клышевская С.В. и др.* Проблемы загрязнения водотоков урбанизированных территорий и пути их решения на примере реки Вторая речка (Владивосток, Приморский край) //

- Чтения памяти Владимира Яковлевича Леванидова. Владивосток: Дальнаука, 2021. С. 43–59.
5. *Гаретова Л.А., Фишер Н.К., Иманова Е.Л. и др.* Особенности формирования органических соединений в грунтах и донных отложениях промзоны г. Хабаровск // *Геохимия*. 2021. № 5. С. 464–472.
  6. *Гаретова Л.А., Фишер Н.К., Кириенко О.А.* Изучение состава и генезиса органического вещества донных отложений загрязненных малых водотоков территории г. Хабаровска // *Водные ресурсы*. 2023. № 2. С. 182–192.
  7. *Гаретова Л.А., Харитоновна Г.В., Иманова Е.Л. и др.* Влияние наводнения 2019 г. на абиотическую и биотическую структуру донных отложений и почв поймы р. Амур // *Геоэкология*. 2022. № 5. С. 61–72.
  8. ГОСТ 12536-2014. Почвы. Методы определения органического вещества. М.: Российский институт стандартизации, 2021. 11 с.
  9. ГОСТ 26213-2021. Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) состава. М.: Стандартинформ, 2021. 23 с.
  10. *Знаменщиков А.Н.* Определение структурно-группового состава и общего содержания углеводов в нефтях и нефтяных загрязнениях спектральными методами: дис. ... канд. хим. наук. Тюмень: ТГУ, 2012. 133 с.
  11. *Кислякова Е.Г.* Изучение геохимического поля экосистем малых рек // *Актуальные проблемы экологии и природопользования: сб. науч. тр. Вып. 13*. М.: РУДН, 2011. Ч. 2. С. 113–117.
  12. *Кошельков А.М., Матюшкина Л.А.* Оценка химического загрязнения почв водоохраных зон малых рек города Хабаровска // *Региональные проблемы*. 2018. № 2. С. 76–85.
  13. *Кремлева Т.А.* Геохимические факторы устойчивости водных систем к антропогенным нагрузкам: автореферат дис. ... д. хим. н. Тюмень: ТГУ, 2015. 60 с.
  14. *Кулаков В.В., Штенгелов Р.С., Матвеев Д.В.* Взаимодействие подземных и поверхностных вод в зоне Хабаровского водного узла // *Науки о Земле и недрапользование*. 2021. № 2. С. 151–158.
  15. *Махинов А.Н., Шугуан Лю, Ким В.И., Махинова А.Ф.* Особенности больших наводнений на реке Амур в период высокой водности 2009–2021 гг. // *Тихоокеанская география*. 2023. № 1. С. 66–74.
  16. *Никитина Л.И., Трибун М.М., Жуков А.В.* Индикационное значение цилиофауны малых рек окрестностей г. Хабаровск // *Вода: химия и экология*. 2012. № 9. С. 57–63.
  17. *Пиковский Ю.И., Геннадиев А.Н., Чернянский С.С., Сахаров Г.Н.* Проблемы диагностики и нормирования загрязнения почв нефтью и нефтепродуктами // *Почвоведение*. 2003. № 9. С. 1132–1140.
  18. *Платонова Т.П., Пакушина А.П., Непрокина К.С., Панова Л.П.* Эколого-химическая характеристика малых рек города Благовещенска // *Экология урбанизированных территорий*. 2018. № 2. С. 21–27.
  19. ПНДФ 16.1:2.2.22-98. Методика выполнения измерений массовой доли нефтепродуктов в минеральных, органоминеральных, органико-минеральных почвах и донных отложениях методом ИК-спектроскопии. М.: Госком. РФ по охране окружающей среды, 2005. 21 с.
  20. ПНДФ 16.1:2.3:3.44-05. Методика выполнения измерений массовой доли летучих фенолов в пробах почв, осадков сточных вод и отходов фотометрическим методом после отгонки водяным паром. М., 2005. 14 с.
  21. *Полянин В.О., Фащевская Т.Б., Словягина А.Н.* Особенности формирования и регулирования диффузного загрязнения в пределах городских территорий (на примере р. Яузы) // *Водные ресурсы*. 2023. № 1. С. 53–67.

22. Приказ № 112 от 24.02.2014 г. “Об утверждении Методических указаний по осуществлению государственного мониторинга водных объектов в части организации и проведения наблюдений за содержанием загрязняющих веществ в донных отложениях водных объектов”.
23. *Рогозина Е.А.* Геохимические изменения в составе нефти при биодegradации // Разведка и охрана недр. 2010. № 4. С. 63–68.
24. *Селезнев А.А., Окунева Т.Г., Ярошенко И.В. и др.* Распределение и накопление тяжелых металлов в ландшафтной катене водосбора и донных отложениях водоема на урбанизированной территории // Известия УГГУ. 2023. № 1. С. 96–107.
25. *Фацевская Т.Б., Словягина А.Н., Полянин В.О., Алгушаева А.В.* Антропогенные изменения гидрохимического режима и качества воды городского водотока (на примере реки Лихоборки, Московский регион) // Водные ресурсы. 2023. № 2. С. 203–217.
26. *Фишер Н.К., Гаретова Л.А., Иманова Е.Л. и др.* Оценка экологического состояния малых рек центральной части Хабаровска в период снеготаяния // Региональные проблемы. 2018. № 3. С. 35–44.
27. *Шевченко М.А.* Экологические проблемы малых рек России // Чистая вода: проблемы и решения. 2009. № 1. С. 84–87.
28. *Шестеркин В.П., Афанасьева М.И., Шестеркина Н.М.* Особенности качества воды малых рек Хабаровска в зимний период // Геоэкология. 2019. № 3. С. 42–51.
29. *Шестеркин В.П., Шестеркина Н.М.* Многолетняя изменчивость стока нитратного и нитритного азота в р. Амур у Хабаровска // Водные ресурсы. 2014. № 4. С. 412–418.
30. *Anh N.T., Can L.D., Nhan N.T. et al.* Influences of key factors on river water quality in urban and rural areas: A review // Case Studies in Chemical and Environmental Engineering. 2023. V. 8: 100424.
31. *Beauchemin S., Kwong Y.T.J.* Impact of redox conditions on arsenic mobilization from tailings in a wetland with neutral drainage // Environmental Science & Technology. 2006. V. 40. P. 6297–6303.
32. *Engloner A.I., Németh K., Dobosy P., Óvári M.* Exploring the trend effects of diffuse anthropogenic pollution in a large river passing through a densely populated area // Heliyon. 2023. V. 9: e20120.
33. *Fang T., Wang H., Liang Y., Cui K. et al.* Source tracing with cadmium isotope and risk assessment of heavy metals in sediment of an urban river, China // Environmental Pollution. 2022. V. 305: 119325.
34. *Goldberg S., Glaubig R.A.* Anion sorption on a calcareous, montmorillonitic soil-arsenic // Soil Science Society of America Journal. 1998. V. 52. P. 1297–1300.
35. *Huang Z., Liu C., Zhao X., Dong J., Zheng B.* Risk assessment of heavy metals in the surface sediment at the drinking water source of the Xiangjiang River in South China // Environmental Sciences Europe. 2020. V. 32. 23.
36. *Khairabadi O., Shirmohamadi V., Sajadzadeh H.* Understanding the mechanism of regenerating urban rivers through exploring the lived experiences of residents: A case study of Abbas Abad River in Hamadan // Environmental Development. 2023. V. 45: 100801.
37. *Manceau A., Marcus M.A., Tamura N. et al.* Natural speciation of Zn at the micrometer scale in a clay soil using X-ray fluorescence, absorption, and diffraction // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2004. V. 68. P. 2467–2483.
38. *Manceau A., Marcus M.A., Tamura N.* Quantative speciation of heavy metals in soils and sediments by synchrotron X-ray techniques // Applications of Synchrotron Radiation in Low-Temperature Geochemistry and Environmental Science. Reviews in Mineralogy and Geochemistry. Washington, DC. 2002. V. 49. P. 341–428.
39. *Tort-Donada J., Santasusagna A., Rode S., Vadri M.T.* Bridging the gap between city and water: A review of urban-river regeneration projects in France and Spain // Science of The Total Environment. 2020. V. 700: 134460.

## ECOLOGICAL AND GEOCHEMICAL ASSESSMENT OF WATERFLOW AND ITS WATERSHED SYSTEM OF POLEZHAEVKA SMALL RIVER (AMUR RIVER BASIN)

L. A. Garetova<sup>a, #</sup>, E. L. Imranova<sup>a</sup>, N. K. Fisher<sup>a</sup>, A. M. Koshelkov<sup>b</sup>

<sup>a</sup>*Institute of Water and Ecological Problems, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences, ul. Dikopol'tseva 56, Khabarovsk, 680000 Russia*

<sup>b</sup>*Institute of Mining Engineering, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences, ul. Turgeneva 51, Khabarovsk, 680000 Russia*

<sup>#</sup>*E-mail: gar-va1948@mail.ru*

The content of dissolved substances,  $C_{org}$ , hydrocarbons, phenols, toxic metals and arsenic are studied in water, bottom sediments and soil of the catchment area of the small urban river Polezhaevka (Khabarovsk). A positive relationship is revealed between the content of  $C_{org}$  and the fraction of 0.01 mm particles in soil. Along the vertical profile of the soil, a decrease in  $C_{org}$  is accompanied by an increase in the content of metals (cadmium, copper, nickel, mercury, lead, zinc) and arsenic. The content of hydrocarbons in water did not exceed 0.18 mg/dm<sup>3</sup> (3.6 MPC); in bottom sediments they were within the limits of permissible hydrocarbon overload of self-purifying capacity  $C_{HC}/C_{org} = 0.07–0.43$ ; and their content did not exceed 141.6 mg/kg in soil. The coefficient of bottom accumulation in terms of iron, manganese, lead and zinc is characterized as “the entry of fresh pollution into a water body.” The information obtained is useful for assessing the geochemical consequences of flooding the floodplains of small rivers and for planning measures on revitalization of urban small rivers.

**Keywords:** *small river, urbanized areas, bottom sediments, soil, organic carbon, hydrocarbons, metals, arsenic*

## REFERENCES

- Vodyanitskii, Yu.N. [Manganese oxides in soils]. Moscow, Dokuchaev Soil Science Institute Publ., 2005, 95 p. (in Russian)
- Vodyanitskii, Yu.N. [Heavy and superheavy metals and metalloids in contaminated soils]. Moscow, Dokuchaev Soil Science Institute Publ., 2009, 182 p. (in Russian)
- Vodyanitskii, Yu.N., Ladonin, D.V., Savichev, A.T. [Soil contamination with heavy metals]. Moscow, Lomonosov Moscow State University Publ., 2012, 304 p. (in Russian)
- Vshivkova, T.S., Nikulina, T.V., Klyshevskaya, S.V. et al. [Problems in pollution of watercourses in urbanized areas and ways to solve them by the example of Vtoraya rechka River (Vladivostok, Primorsky Krai)]. Proc. of readings in commemoration of V.Ya. Levanidov. Vladivostok, Dal'nauka Publ., 2021, pp. 43–59. (in Russian)
- Garetova, L.A., Fisher, N.K., Imranova, E.L., et al. Features of formation of organic compounds in the ground and bottom sediments within the industrial zone of Khabarovsk. *Geochemistry International*, 2021, no. 5, pp. 528–536.
- Garetova, L.A., Fisher, N.K., Kirienko, O.A. Studying the composition and genesis of organic matter in bottom sediments of polluted small watercourses in Khabarovsk city territory. *Water Resources*, 2023, no. 2, pp. 297–306.
- Garetova, L.A., Kharitonova, G.V., Imranova, E.L., et al. [The impact of the 2019 flood on the abiotic and biotic structure of bottom sediments and soils in the Amur River floodplain]. *Geoekologiya*, 2022, no. 5, pp. 61–72. (in Russian)
- [GOST 12536-2014 Soils. Methods for determining organic matter]. Moscow, Russian Institute of Standardization, 2021, 11 p. (in Russian)
- [GOST 26213-2021 Soils. Methods for laboratory determination of granulometric (grain) composition]. Moscow, Standardinform Publ., 2021, 23 p. (in Russian)
- Znamenshchikov, A.N. [Determination of the structural-group composition and total content of hydrocarbons in oils and oil pollution by spectral methods]. Extended Abstract of Doctoral (Chem.) Dissertation, Tyumen, TGU Publ., 2012, 133 p. (in Russian)
- Kislyakova, E.G. [Study of the geochemical field of ecosystems of small rivers]. In: [Current problems of ecology and environmental management. Collection of Sci. Articles]. Moscow, RUDN Publ., 2011. vol. 13, chapter 2, pp. 113–117. (in Russian)
- Koshel'kov, A.M., Matyushkina, L.A. [Assessment of chemical contamination of soils in water protection zones of small rivers in the city of Khabarovsk]. *Regional'nye problemy*, 2018, no. 2, pp. 76–85. (in Russian)
- Kremleva, T.A. [Geochemical factors of resistance of aquatic systems to anthropogenic loads]. Extended Abstract of Doctoral (Chem.) Dissertation, Tyumen, TGU Publ., 2015, 60 p. (in Russian)
- Kulakov, V.V., Shtengelov, R.S., Matveenko, D.V. [Interaction of groundwater and surface water in the Khabarovsk water hub area]. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie*, 2021, no. 2, pp. 151–158. (in Russian)
- Makhinov, A.N., Shuguan Lyu, Kim, V.I., Makhinova, A.F. [Features of large floods on the Amur River during the highwater period in 2009–2021]. *Tikhookeanskaya geografiya*, 2023, no. 1, pp. 66–74. (in Russian)
- Nikitina, L.I., Tribun, M.M., Zhukov, A.V. [Indicative value of cili fauna in small rivers in the vicinity of Khabarovsk]. *Voda: khimiya i ekologiya*, 2012, no. 9, pp. 57–63. (in Russian)
- Pikovskii, Yu. I., Gennadiev, A.N., Chernyanskii, S.S., Sakharov, G.N. [Problems of diagnostics and regulation of soil pollution with oil and petroleum products]. *Pochvovedenie*, 2003, no. 9, pp. 1132–1140. (in Russian)
- Platonova, T.P., Pakusina, A.P., Neprokina, K.S., Panova, L.P. [Ecological and chemical characteristics of small rivers of the city of Blagoveshchensk]. *Ekologiya urbanizirovannykh territorii*, 2018, no. 2, pp. 21–27. (in Russian)
- [PNDF 16.1:2.2:22-98. Methodology for measuring the mass fraction of petroleum products in mineral, organogenic, organo-mineral soils and bottom sediments using the IR spectrometry method]. Moscow, Russian State Committee on environment conservation, 2005, 21 p. (in Russian)
- [PNDF 16.1:2.3:3.44-05. Methodology for measuring the mass fraction of volatile phenols in soil samples, sewage sludge and waste using the photometric method after steam distillation]. Moscow, 2005, 14 p. (in Russian)
- Polyanin, V.O., Fashchevskaya, T.B., Slovyagina, A.N. Specific features of the formation and regulation of diffuse pollution in urban areas: case study of the Yauza River. *Water Resources*, 2023, no. 1, pp. 82–95.
- [Order no. 112, dated February 24, 2014 “On approval of the Methodological Instructions for the implementation of state monitoring of water bodies in terms of organizing and conducting observations of the content of pollutants in bottom sediments of water bodies”]. (in Russian)
- Rogozina, E.A. [Geochemical changes in the composition of oil during biodegradation]. *Razvedka i okhrana nedr*, 2010, no. 4, pp. 63–68. (in Russian)
- Seleznev, A.A., Okuneva, T.G., Yarmoshenko, I.V., et al. [Distribution and accumulation of heavy metals in the landscape catena of a watershed and bottom sediments of a reservoir in an urbanized area]. *Izvestiya UGGU*, 2023, no. 1, pp. 96–107. (in Russian)
- Fashchevskaya, T.B., Slovyagina, A.N., Polyaniin, V.O., Algushaeva, A.V. Anthropogenic changes in the hydrochemical regime and water quality in an urban watercourse: case study of the Likhoborka River, Moscow region. *Water Resources*, 2023, no. 2, pp. 302–316.
- Fisher, N.K., Garetova, L.A., Imranova, E.L., et al. [Assessment of the ecological state of small rivers in the central part of Khabarovsk during the snowmelt period]. *Regional'nye problemy*, 2018, no. 3, pp. 35–44. (in Russian)
- Shevchenko, M.A. [Environmental problems of small rivers in Russia]. *Chistaya voda: problemy i resheniya*, 2009, no. 1, pp. 84–87. (in Russian)
- Shesterkin, V.P., Afanas'eva, M.I., Shesterkina, N.M. [Features of water quality in small rivers of Khabarovsk in winter]. *Geoekologiya*, 2019, no. 3, pp. 42–51. (in Russian)
- Shesterkin, V.P., Shesterkina, N.M. Long-term variability of nitrate and nitrite nitrogen runoff in the Amur River near Khabarovsk. *Water Resources*, 2014, no. 4, pp. 439–445. (in Russian)
- Anh, N.T., Can, L.D., Nhan, N.T. et al. Influences of key factors on river water quality in urban and rural areas: A review. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 2023, vol. 8, paper 100424.
- Beauchemin, S., Kwong, Y.T.J. Impact of redox conditions on arsenic mobilization from tailings in a wetland with neutral drainage. *Environmental Science & Technology*, 2006, vol. 40, pp. 6297–6303.
- Engloner, A.I., Németh, K., Dobosy, P., Óvári, M. Exploring the trend effects of diffuse anthropogenic pollution in a large river passing through a densely populated area. *Heliyon*, 2023, vol. 9, paper e20120.
- Fang, T., Wang, H., Liang, Y., Cui, K., et al. Source tracing with cadmium isotope and risk assessment of heavy metals in sediment of an urban river, China. *Environmental Pollution*, 2022, vol. 305, paper 119325.
- Goldberg, S., Glaubig, R.A. Anion sorption on a calcareous, montmorillonitic soil-arsenic. *Soil Science Society of America Journal*, 1998, vol. 52, pp. 1297–1300.

35. Huang, Z., Liu, C., Zhao, X., et al. Risk assessment of heavy metals in the surface sediment at the drinking water source of the Xiangjiang River in South China, *Environmental Sciences Europe*, 2020, vol. 32, paper 23.
36. Khairabadi, O., Shirmohamadi, V., Sajadzadeh, H. Understanding the mechanism of regenerating urban rivers through exploring the lived experiences of residents: A case study of Abbas Abad River in Hamadan, *Environmental Development*, 2023, vol. 45, paper 100801.
37. Manceau, A., Marcus, M.A., Tamura, N., et al. Natural speciation of Zn at the micrometer scale in a clay soil using X-ray fluorescence, absorption, and diffraction, *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2004, vol. 68, pp. 2467–2483.
38. Manceau, A., Marcus, M.A., Tamura, N. Quantitative speciation of heavy metals in soils and sediments by synchrotron X-ray techniques. Applications of Synchrotron Radiation in Low-Temperature Geochemistry and Environmental Science. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*. Washington, DC, 2002, vol. 49, pp. 341–428.
39. Tort-Donada, J., Santasusagna, A., Rode, S., Vadri, M.T. Bridging the gap between city and water: A review of urban-river regeneration projects in France and Spain. *Science of The Total Environment*, 2020, vol. 700, paper 134460.

УДК 504.054:543.621

## ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ФОРМЫ НАХОЖДЕНИЯ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ И ИХ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ В ОТХОДАХ ОБОГАЩЕНИЯ СУЛЬФИДСОДЕРЖАЩИХ РУД (НА ПРИМЕРЕ ДЖИДИНСКОГО ВОЛЬФРАМОВО-МОЛИБДЕНОВОГО КОМБИНАТА, БУРЯТИЯ)

© 2024 г. Б. В. Дампилова<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>Геологический институт им. Н.Л. Добрецова СО РАН,  
ул. Сахьяновой ба, Улан-Удэ, 670047 Россия

\*E-mail: bdampilova@mail.ru

Поступила в редакцию 20.06.2024 г.

После доработки 22.08.2024 г.

Принята к публикации 10.10.2024 г.

Представлены результаты исследований валового содержания, форм нахождения тяжелых металлов (Cu, Zn, Ni, Pb) и их распределения по вертикальному разрезу в техногенных песках сульфидсодержащих отходов обогащения бывшего Джидинского вольфрамово-молибденового комбината (Бурятия). В результате деятельности комбината в течение нескольких десятилетий образовалось три хвостохранилища общим объемом отходов производства более 40 млн т. Для исследования были отобраны пробы техногенных песков на намывном хвостохранилище по пробуренной скважине на глубинах 0–20 и 20–40 м. Полученные результаты свидетельствуют о влиянии гранулометрического состава на содержание и подвижность элементов. Показано, что содержание элементов в пылевой фракции (<0.16 мм) больше, чем в более крупных гранулометрических фракциях независимо от глубины залегания техногенных песков. Определение форм нахождения элементов и их распределения по геохимическим формам выявило, что ионообменная форма элементов активно выщелачивается из пылеватых и мелких фракций песков. Подвижности элементов из техногенных песков способствует также высокая кислотность отходов сульфидсодержащих руд. Сравнение валового содержания Zn, Cu, Pb, Ni и их подвижных форм в техногенных песках выявило превышение ПДК. Таким образом, результаты исследований свидетельствуют о превышении нормативов и вредном воздействии отходов руд на окружающую среду.

**Ключевые слова:** тяжелые металлы, формы нахождения, миграция, сульфидсодержащие отходы, техногенный песок, гранулометрический состав

DOI: 10.31857/S0869780924060086 EDN: ALRQR

### ВВЕДЕНИЕ

Интенсивное использование и разработка месторождений полезных ископаемых сопровождаются образованием отходов обогащения руд и ухудшением состояния окружающей среды. Оценка экологической опасности накопленных техногенных отходов горнодобывающих предприятий зависит от выявления веществ загрязнителей, общего их количества, нахождения подвижных форм токсичных элементов и путей миграции этих элементов в окружающую среду [1, 5, 15, 16, 18]. Под воздействием природных явлений (ветра, дождя, таяние снега и т.п.) происходит преобразование техногенных веществ отходов обогащения руд в подвижные формы токсичных элементов. Подвижность элементов зависит от гранулометрического состава материала хвостохранилищ, реакции среды, содержания оксидов, гидроксидов, карбонатов и органического вещества. Влияние гранулометрического состава

на содержание и подвижность элементов рассмотрены в некоторых работах. В тонкодисперсном материале хвостов обогащения лопаритовых руд месторождения в Ловозерских тундрах установлено концентрирование РЗЭ, Zn, Sr, Mn, Sb, Cd, W, Th, Pb, Fe, Cu (Ловозерский ГОК) [13]. При взаимодействии тонкой фракции хвостов обогащения (<0.071 мм) лопаритовых руд с растворами, имитирующими почвенные воды, концентрации загрязняющих веществ в растворах превышают предельно допустимые для водных объектов рыбохозяйственного значения в несколько раз [14]. При этом содержание этих элементов в частицах размером <0.071 мм в 1.5–2 раза превышает их количество в частицах более крупных размеров (0.071–0.1; 0.1–0.25 мм).

Исследования [2] по определению химического состава фракций обломочного материала горнопородных отвалов и хвостохранилища на месторождении апатита Кукисвумчорр также показали

характерное увеличение накопления числа химических элементов в наиболее тонких гранулометрических фракциях (<0.044 мм). В данных фракциях происходит концентрирование Cu, Pb, Zn, Co, Mn, Y, Yb, Ce, La, P, Ti, V, Cr, Be, Sn, As, Sr, Nb. Выявлена высокая интенсивность процесса миграции Be, Pb, As из лежалых хвостов. Сделан вывод о том, что микроэлементы, концентрирующиеся в материале мелких фракций (<0.044 мм) рудничных отвалов и особенно хвостохранилищ, могут становиться источником загрязнения природных вод. Также возможен вынос тяжелых металлов со значительных площадей техногенных образований в виде пыли благодаря ветровому разносу [23, 29, 30]. Ветровой разнос способствует дальнему переносу токсичных элементов от источников загрязнения. В частицах пыли техногенного происхождения установлены высокие содержания тяжелых металлов, Br, Se, As, Sb [28]. Установлено, что пыль с техногенных источников сильно обогащена подвижными формами призматических элементов по сравнению с основным техногенным материалом. Матричные элементы, поступающие в основном из природных источников (Al, Fe, Si, Na), обычно связаны с более крупными фракциями аэрозоля твердых частиц (размером 3–5 мкм и больше).

В работе [17] выявлено увеличение концентрации элементов токсикантов в объектах наземной среды в результате атмосферного рассеивания мелкодисперсных минеральных частиц с хвостохранилищ золоторудного месторождения. Влияние гранулометрического состава на подвижность и токсичность тяжелых металлов отмечена в загрязненных почвах [22] и донных отложениях [11, 19]. Выявлено накопление тяжелых металлов и повышенное содержание их подвижных и биодоступных форм в тонкодисперсных глинистых фракциях донных отложений. Установлена достоверная связь между подвижными формами меди, цинка и содержанием глинистых фракций и органического вещества. Таким образом, подвижность металлов в значительной степени зависит от гранулометрического состава материала. Изучение поведения элементов в техногенных песках и определение их подвижности в зависимости от гранулометрического состава материала хвостохранилищ относятся к приоритетным задачам в современных экологических исследованиях отработанных и разрабатываемых рудных территорий.

На территории Джидинского рудного района (Западное Забайкалье) в течение нескольких десятилетий производилась добыча и обогащение



**Рис. 1.** Космический снимок территории хвостохранилищ (2010 г.): I – насыпное, II – намывное (гидроотвал), III – аварийное.

вольфрамо-молибденовых руд (1934–1997 гг.) [4, 25]. С 2011 г. по настоящее время отходы обогащения сульфидсодержащих руд подвергаются вторичной переработке. За годы работы горно-обогажительных фабрик было образовано три хвостохранилища общим объемом отходов производства более 40 млн т. (рис. 1).

Первое – насыпное хвостохранилище создано в начальный период работы обогажительной фабрики и прилегало непосредственно к территории рабочего поселка, который впоследствии стал городом Закаменск. В хвостохранилище накапливались хвосты и пульпы вольфрамовых фабрик. Второе хвостохранилище – намывное (гидроотвал), расположено в устье р. Барун-Нарын в распадке между горными хребтами. Поэтому хвостохранилище имеет форму треугольника с шириной у основания около километра и протяженностью вверх по долине р. Барун-Нарын приблизительно 1700 м (рис. 2).

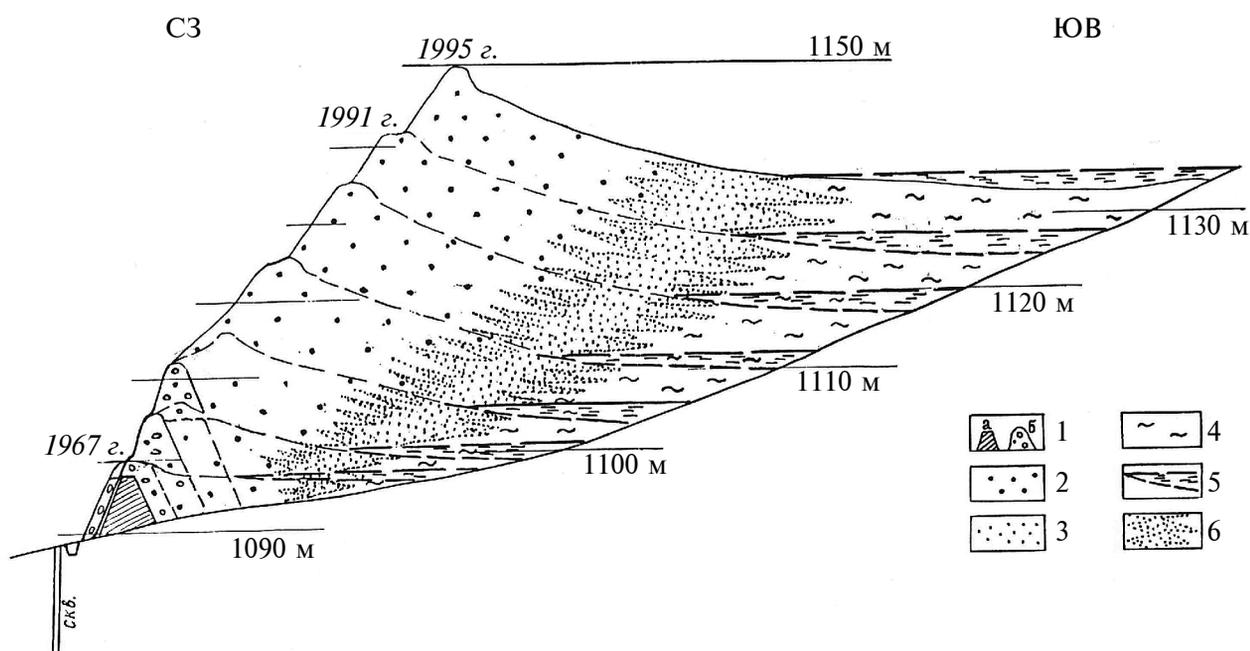
В 2010–2012 гг. лежалые пески с насыпного (см. рис. 1, I) и аварийного (см. рис. 1, II) хвостохранилища были перевезены на территорию намывного (см. рис. 1, III) хвостохранилища поближе к действующему по настоящее время комбинату для их вторичной переработки. Перевозка осуществлялась вблизи русла р. Модонкуль. Помимо смыва материала хвостохранилища в р. Модонкуль, впадающей в р. Селенга (приток оз. Байкал), произошла дополнительная нагрузка на экологическое состояние окружающей среды и здоровье населения г. Закаменск [3, 10, 12, 26, 27]. При

транспортировке техногенных песков грузовыми машинами с открытым кузовом произошло активное рассеивание загрязняющих веществ в виде пыли в атмосфере за пределами санитарной зоны городской территории. Еще не слежавшийся перевезенный песок подвергался естественному ветровому разному. В связи с этим были проведены различные исследовательские работы по оценке воздействия отходов обогащения руд на компоненты окружающей природной среды: почвы, водные и растительные объекты [6, 8, 25]. В результате анализа природных объектов обнаружено, что произошло увеличение концентрации элементов-токсикантов в объектах наземной среды за счет атмосферного рассеивания мелкодисперсных частиц отходов руд. После рекультивации земель произошло неполное зарастание растительностью площадей, занятых техногенными песками.

Цель представленного исследования – изучение содержания и распределения элементов по геохимическим формам, гранулометрическому составу и по вертикальному разрезу техногенных песков в отходах обогащения сульфидсодержащих руд намывного хвостохранилища бывшего Джидинского вольфрамово-молибденового комбината (ДВМК).

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Пробы техногенных песков были отобраны на намывном хвостохранилище по пробуренной скважине на глубинах 0–20 и 20–40 м. Образцы



**Рис. 2.** Схема формирования намывного хвостохранилища. 1 – дамба (а) и ее ядро (б); 2–4 – разновидности материала хвостохранилища: 2 – крупно-, среднезернистые пески, 3 – мелко-, тонкозернистые пески, алевритистые осадки (пылеватые пески), 4 – тонкозернистые пески, илистые осадки (илы); 5 – водоносный горизонт; 6 – граница литологических разностей.

высушивались и ситовались по фракциям (мм): 0.16; 0.16–0.32; 0.32–0.5; 0.5–1.0. Для валового анализа пробы перетирались в агатовой ступке, для изучения форм нахождения элементов образцы просеивались через сита 1 мм. Масса навески для определения валового содержания составляла 0.25 г, подвижных форм – 0.5 г.

Геохимическую подвижность элементов, способность их растворяться в поровом растворе и мигрировать в природную среду с доступом в биологические объекты оценивают экспериментально с помощью методов экстрагирования. Данные методы позволяют выделить водо- и кислоторастворимые формы (ионообменные), которые могут мигрировать в окружающую среду (почвы, воды). Извлечение подвижных форм элементов возможно осуществить с помощью методов экстрагирования элементов в статическом и динамическом режимах экстрагирования [7, 31, 32]. В данной работе использована схема 5-стадийного последовательного экстрагирования BCR (Community Bureau of Reference, Institute for Reference Materials and Measurements) в статическом режиме, в результате были выделены следующие геохимические формы:

I – ионообменная водо- и кислоторастворимая форма (концентрируются металлы, адсорбированные на поверхности глинистых частиц и легко переходящие в раствор при изменениях pH, а также карбонатные формы);

II – оксидов железа и марганца (эти поглоатели металлов нестабильны при дефиците кислорода);

III – органических веществ и сульфидов (освобождение растворимых металлов из этой формы возможно в окислительных условиях);

IV – остаточная форма.

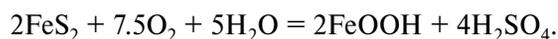
Наряду с исследованными образцами анализировался стандартный образец BCR-701 с аттестованным содержанием экстрагируемых форм Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn. Валовое содержание химических элементов в пробах определялось на рентгенофлуоресцентном спектрометре ARL Perform'X; количество элемента в растворе – на масс-спектрометре с индуктивно связанной плазмой высокого разрешения Element XR Thermo scientific Fisher (ЦКП “Геоспектр” ГИН СО РАН, г. Улан-Удэ).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Усредненный химический состав объединенной по скважине пробы техногенных песков следующий, [%]: SiO<sub>2</sub> – 63.6; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 13.8; Mo – 4.74; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 4.68; W – 4.52; Pb – 3.78; Zn – 3.76; K<sub>2</sub>O – 3.66; Ba – 2.72; CaO – 2.63; Na<sub>2</sub>O – 2.22; S – 2.19; MgO – 2.19; F – 1.79; Cu – 1.45; FeO – 1.27; Cs – 0.92; Ce – 0.28;

MnO – 0.21; Sb – 0.16; Cd – 0.05; Ag – 0.05. Высокое содержание оксида кремния и алюминия связано прежде всего с тем, что в минеральный состав лежалых хвостов входят кварц – SiO<sub>2</sub> (35%), мусковит – KAl<sub>2</sub>(AlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub>)(OH,F)<sub>2</sub> (22%), плагиоклаз – (Na,Ca)AlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub> (18%) [9, 25]. В материале хвостохранилища также выявлены пирит – FeS<sub>2</sub> (6%), микроклин KAlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub> (6%), эпидот – Ca<sub>2</sub>Al<sub>2</sub>Fe<sup>III</sup>(SiO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>OH (3.5%), флюорит – CaF<sub>2</sub> (3%), амфибол – ленточные силикаты с содержанием Na, K, Ca, Pb (1%), гюбнерит – MnWO<sub>4</sub> (0.5%).

Пирит, содержащийся в отходах руд, окисляется с образованием серной кислоты:



Образование кислых дренажных растворов обуславливает низкие значения pH водной вытяжки техногенных песков, которые находятся в пределах от 3.3 до 6.8. Сравнение значений ориентировочно допустимых концентраций (ОДК) элементов и их валовых содержаний (табл. 1) свидетельствует о превышении нормативов. Содержание Cu превышает его ОДК в 3.3–9.7 раз, Zn – в 4.2–10.9 раз, Pb – 5.5–25 раз.

Сравнительный анализ валового содержания элементов на разных глубинах выявил следующее (см. табл. 1). Содержание марганца и мышьяка одинаково по всему разрезу хвостохранилища. Количество железа, серы (сульфидная форма), цинка, никеля на глубине 0–20 м в 1.5–2 раза больше по сравнению с нижним слоем (20–40 м). И наоборот, содержание меди, свинца, вольфрама, молибдена больше в нижнем слое, чем в верхнем (0–20 м). В особенности это касается молибдена. Так, его количество в верхнем слое варьирует в пределах 0.07–0.17%, в нижнем слое – 0.67–0.98%.

По всей глубине скважины наблюдается разница в содержании элементов в зависимости от фракции техногенного песка (см. табл. 1). Между фракциями различной крупности в отличие от других элементов незначительно варьируют количества марганца, серы в сульфатной форме и мышьяка. При этом наблюдается следующее: независимо от глубины залегания техногенных песков содержание каждого из элементов в пылевой фракции (0.16 мм) превышает их количество в более крупных гранулометрических фракциях. Хотя доля фракции менее 0.32–0.1 мм составляет всего 19% от общей массы по данным гранулометрической характеристики лежалых песков хвостов обогащения ДВМК [9]. Основная масса техногенных песков состоит из фракций 0.5–2.0 мм классов крупности (68.7% от общей массы). Имеет место также тенденция к увеличению мелких фракций с глубиной, что вероятно обусловлено растворением крупных частиц под воздействием кислых дренажных вод, а также их механической деградацией в условиях резко континентального климата [21].

Таблица 1. Общее содержание элементов в исследуемых образцах

Глубина скважины, м	Размер фракции, мм	Fe	Mn	S*	S**	Cu	Zn	Pb	Ni	As	W	Mo
		%				мг/кг						
0–20	0.5–1	2.89	0.16	2.13	0.21	110	440	110	39	3	330	110
	0.32–0.5	3.83	0.14	2.96	0.22	100	420	260	45	2	510	150
	0.16–0.32	5.67	0.14	4.66	0.25	130	530	390	54	4	500	170
	<0.16	6.11	0.18	4.62	0.35	140	600	520	58	5	600	170
20–40	0.5–1	1.71	0.12	0.81	0.22	100	230	300	25	4	260	670
	0.32–0.5	2.43	0.11	1.20	0.25	180	240	370	21	4	290	860
	0.16–0.32	2.56	0.11	1.62	0.26	250	240	360	20	3	310	960
	<0.16	2.69	0.15	1.19	0.30	320	530	800	23	2	850	980
ПДК/ОДК		–		160/–		–/33	–/55	–/32	–/20	–/2.0	–	–

Примечание: S\* – сульфидная форма, S\*\* – сульфатная форма.

Неоднородность вещественного и количественно-го состава техногенных песков также обусловлена воздействием на них естественных процессов эрозии (дожди, снега, ветра) в период наполняемости хвостохранилища, а также миграцией химических элементов в кислой среде сульфидсодержащих отходах руд. Таким образом, происходит процесс накопления наиболее тонкодисперсных частиц, обогащенных различными элементами.

Рассмотрим содержание в образцах ионообменных форм элементов, т.е. наиболее водо- и кислоторастворимых форм, так как это актуально для кислых сульфидсодержащих отходов руд. Ионообменная форма элементов является самой подвижной и непосредственно доступной для окружающей среды обменной формой. При этом кислая среда оказывает огромное влияние на подвижность меди, цинка, железа и марганца. Содержание этих элементов увеличивается с повышением кислотности среды в отличие от молибдена. Подвижность молибдена в кислых средах понижается, в щелочных увеличивается.

Цинк, медь и свинец содержатся в больших количествах в исследованных техногенных песках и поэтому являются основными токсикантами и загрязнителями [7]. Из анализа данных диаграммы распределения ионообменных форм тяжелых металлов (рис. 3) следует зависимость содержания форм Cu, Zn и Pb от гранулометрического состава, которая рассматривалась выше. На глубине 0–20 м эта зависимость более выражена по сравнению с содержанием элементов в ионообменной форме на глубине 20–40 м. Вероятно, данный факт обусловлен тем, что с течением времени химические процессы в более нижних слоях пришли в равновесие, техногенные пески слежались и более не подвергаются различным процессам (ветровая и водная эрозия, замерзание/оттаивание и т.п.) в отличие от вышележащего слоя песков.

Количество исследуемых Cu, Zn, Pb на глубине 0–20 м в пылевой фракции (<0.16 мм) достигает 24.5, 91.4, 95.3 мг/кг соответственно, и примерно в 2–3 раза превышает содержание ионообменных форм этих элементов во фракции 0.5–1 мм: 7.6, 43.5, 40.8 мг/кг соответственно (табл. 2, 3). На глубине 20–40 м наблюдается аналогичная зависимость. Данный факт очевиден, поскольку миграция подвижных форм элементов происходит легче и быстрее с более мелких зерен, у которых площадь соприкосновения с окружающей средой больше по сравнению с крупными. Следовательно, данные элементы в большом количестве находятся в растворимой форме, несмотря на то, что техногенные пески хранились много лет, и по данным А.Н. Дьяченко [9], объем пылевой фракции от общего количества техногенных песков составляет всего 27.6%. Содержание Cu между фракциями 0.16–0.32 и 0.32–0.5 мм на обоих интервалах глубин примерно одинаково. Количество Zn и Pb в нижнем слое сопоставимо, а вот на глубине 0–20 м наблюдается повышенные

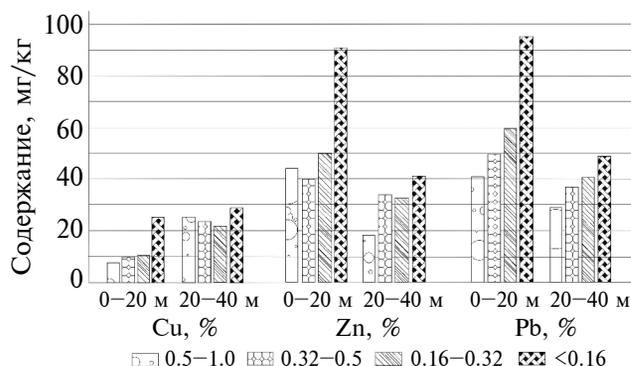


Рис. 3. Диаграмма распределения ионообменных форм Cu, Zn, Pb в техногенных песках хвостохранилища ДВМК по гранулометрическому составу.

содержания в более мелкой фракции (0.16–0.32 мм) по сравнению с фракцией 0.32–0.5 мм. Количество ионообменных форм W, As, Mo, Ni, в образцах не превышает 5 мг/кг (см. табл. 2, 3).

Таким образом, по убыванию подвижности химические элементы располагаются в ряд: Pb > Zn > Cu > W > As > Ni > Mo. Несмотря на небольшое содержание элементов в ионообменной форме (Pb – 7–19%, Zn – 6–12%, Cu – 4–15%), эти загрязнители опасны для окружающей среды. Превышение значений ПДК подвижных форм элементов выявлено по Pb до 15.8 раз, по Zn в 3.9 раза, по Cu до 2.5–9.5 раза. Никель содержится в отходах обогащения ниже предусмотренных ПДК [24]. Исследуемые техногенные пески содержат довольно высокие количества подвижных форм Fe и Mn, которые находятся в пределах 83–112 и 200–335 мг/кг соответственно. Однако эти значения не превышают ПДК.

Распределение элементов по геохимическим формам различно. Большая часть Cu, Zn, Ni, Mo, Fe сконцентрировалась в III форме, при этом содержание каждого элемента составляет, [%]:

Cu – 74–88, Zn – 70–85, Ni – 46–92, Mo – 82–94, Fe – 69–88. Данные элементы связаны с органическими веществами ввиду усвоения их микроорганизмами, которые участвуют в бактериальном превращении и являются типичными эссенциальными элементами с высокими коэффициентами биологического поглощения. В табл. 1 показано преимущественное содержание сульфидных форм элементов. Скорее всего, распределение по формам связано с образованием сульфидов, а в табл. 2 показано содержание Cu, Zn, Mo, Fe, Ni в техногенных песках по геохимическим формам (мг/кг) и максимальное содержание именно в форме III. Кроме того, высокодисперсные минеральные частицы легко сорбируют природные органические соединения, например, гумусовое вещество с образованием микроагрегатов. Тяжелые металлы оказываются включенными в пленки и сгустки, которые образуют микроагрегаты и адсорбируются на поверхности частиц твердой фазы. Однако, медь склонна к образованию растворимых форм с органическим веществом, и на минеральных частицах она скорее всего будет в форме сульфидов. Цинк, как и никель,

**Таблица 2.** Содержание и распределение Cu, Zn, Mo, Fe, Ni в техногенных песках по геохимическим формам (мг/кг)

Фракция, мм	Форма	Cu		Zn		Mo		Fe		Ni	
		глубина, м		глубина, м		глубина, м		глубина, м		глубина, м	
		0–20	20–40	0–20	20–40	0–20	20–40	0–20	20–40	0–20	20–40
0.5–1.0	I	7.6	15.1	43.5	18.2	0.3	0.5	230	260	0.2	0.7
	II	4.8	14.1	16.5	5.3	0.4	2.3	620	1214	2.1	5.5
	III	<b>110</b>	<b>153</b>	<b>264</b>	<b>208</b>	<b>6.1</b>	<b>38.7</b>	<b>18405</b>	<b>13670</b>	<b>12.8</b>	<b>14.5</b>
	IV	3.4	6.7	42.4	66.4	0.4	1.3	6744	4630	3.9	9.6
0.32–0.5	I	9.5	24.3	40.4	34.2	0.3	0.7	200	305	0.2	0.9
	II	4.2	9.9	11.5	7.5	0.3	3.1	640	1075	0.9	1.1
	III	<b>126</b>	<b>118</b>	<b>521</b>	<b>322</b>	<b>8.3</b>	<b>150.8</b>	<b>36628</b>	<b>24074</b>	<b>23.5</b>	<b>11.3</b>
	IV	5.9	4.0	57.9	33.7	0.5	5.1	7210	4908	4.6	3.0
0.16–0.32	I	10.7	22.1	49.7	32.9	0.5	0.4	305	335	0.7	0.8
	II	6.2	10.6	12.4	5.9	0.8	0.7	850	1132	1.4	4.9
	III	<b>194</b>	<b>217</b>	<b>489</b>	<b>389</b>	<b>7.9</b>	<b>42.3</b>	<b>43745</b>	<b>29382</b>	<b>76.6</b>	<b>10.2</b>
	IV	51.9	9.3	57.5	47.1	0.4	1.7	6046	4173	4.2	6.4
<0.16	I	24.5	28.6	91.4	41.1	0.3	0.3	245	230	0.8	1.1
	II	12.9	17.3	18.1	12.8	0.6	3.9	800	1491	1.4	1.2
	III	<b>318</b>	<b>273</b>	<b>955</b>	<b>576</b>	<b>8.1</b>	<b>64.0</b>	<b>53687</b>	<b>31010</b>	<b>29.0</b>	<b>11.6</b>
	IV	7.4	6.6	53.4	47.1	0.3	1.3	6511	5349	3.4	3.2
ПДК		3.0		23		–		–		4.0	

Примечание. Жирным шрифтом в табл. 2 и 3 обозначены наибольшие содержания элемента среди выделенных геохимических форм.

**Таблица 3.** Содержание и распределение Pb, W, Mn, As в техногенных песках по геохимическим формам (мг/кг)

Фракция, мм	Форма	Pb		W		Mn		As	
		глубина, м		глубина, м		глубина, м		глубина, м	
		0–20	20–40	0–20	20–40	0–20	20–40	0–20	20–40
0.5–1.0	I	40.8	29.2	3	3	112	100	2.8	3.7
	II	<b>92.4</b>	<b>106</b>	4.2	3.6	77	50	2	3.6
	III	<b>75.2</b>	<b>121</b>	<b>298</b>	<b>97.6</b>	<b>449</b>	<b>359</b>	10.1	15.3
	IV	2.4	7.4	<b>206</b>	<b>108</b>	<b>520</b>	<b>364</b>	<b>115</b>	<b>115</b>
0.32–0.5	I	50.1	32.9	3	5	96	83	2.3	4.1
	II	<b>131</b>	<b>104</b>	4.2	5.7	56	44	2.2	2.1
	III	<b>217</b>	<b>165</b>	<b>353</b>	<b>133</b>	<b>722</b>	<b>481</b>	18.1	14.4
	IV	8.3	9.2	<b>187</b>	<b>115</b>	<b>458</b>	<b>388</b>	<b>122</b>	<b>108</b>
0.16–0.32	I	60.1	40.6	1.2	1.2	104	83	4.2	2.5
	II	<b>133</b>	<b>129</b>	11.9	1.2	56	43	2.6	2.2
	III	<b>180</b>	<b>257</b>	<b>169</b>	<b>232</b>	<b>471</b>	<b>459</b>	17.8	18.8
	IV	5.2	13.8	<b>142</b>	<b>72.2</b>	<b>391</b>	<b>392</b>	<b>116</b>	<b>146</b>
<0.16	I	95.3	48.8	3	3	112	95	4.6	2.4
	II	<b>194</b>	<b>180</b>	3	3	55	65	3.8	2.2
	III	<b>437</b>	<b>443</b>	<b>617</b>	<b>451</b>	<b>614</b>	<b>631</b>	18.9	25.5
	IV	6.8	11.8	<b>239</b>	<b>144</b>	<b>520</b>	<b>437</b>	<b>107</b>	<b>133</b>
ПДК		6.0		–		–		–	

имеет меньшее сродство к органическому веществу и тоже будет в форме сульфидов. Поэтому в этом случае активная роль микроорганизмов на большой глубине в кислой среде маловероятна.

Микроорганизмы усваивают из микроэлементов марганец. Доля подвижного марганца в ионообменной форме находится в пределах 7.2–11.4% от общего содержания независимо от глубины залегания техногенных песков и их гранулометрического состава. Марганец сосредоточен в III и IV геохимических формах, также, как и вольфрам. При этом содержание вольфрама, аналогично марганцу, в форме органических веществ и сульфидов (III форма) преобладает над остаточной IV формой (см. табл. 3). Однако подвижность вольфрама в техногенных песках низкая, и его количество в ионообменной форме составляет всего 0.3–3.9%.

Низкой подвижностью также характеризуется молибден. Его количество в данной форме не превышает 0.7 мг/кг по всей глубине хвостохранилища. Основная доля молибдена связана с органическими веществами и сульфидами. При этом количество молибдена на глубине 0–20 м составляет 6.1–8.3 мг/кг (82–88%), а на глубине 20–40 м – 43–160 мг/кг (90–94%). Низкие содержания

молибдена в верхнем слое хвостохранилища вероятно обусловлены улучшением производительности аппаратов извлечения элементов из руд. Из истории развития ДВМК известно, что фабрика была запущена в работу в 1936 г. Тридцать лет спустя в 1963 г. была освоена новая технология обогащения руд с получением промпродукта. С каждым десятилетием увеличивалась производительность комбината с совершенствованием технологических процессов. Однако при добыче вольфрама возникали трудности его извлечения, связанные с нахождением металла в породе. Основными рудными минералами вольфрамо-молибденового месторождения являются молибденит ( $\text{MoS}_2$ ), гюбнерит ( $\text{MnWO}_4$ ), шеелит ( $\text{CaWO}_4$ ) [4]. В настоящее время отмечена потеря вольфрама при его добыче из техногенных песков при их вторичной переработке [9], связанная со сложностью обогащения. Вероятно, с подобной проблемой сталкивались при извлечении вольфрама из руды и ранее. Поэтому содержание вольфрама в хвостохранилище по глубине скважины не сильно различается.

Из всех изученных элементов только свинец (см. табл. 3) имеет сравнительно равные доли по содержанию элемента между геохимическими формами: оксидов железа и марганца (форма II – от 26

до 44%) и сульфидами (форма III – от 36 до 65%). Оксиды железа и марганца являются хорошими поглотителями следовых металлов и нестабильны при условии дефицита кислорода. Поэтому форма II является переходной, и при изменении условий возможна ее трансформация в подвижную (I) или органическую формы (III).

Диаграмма распределения мышьяка по геохимическим формам совершенно отличается от диаграмм других элементов (см. табл. 3). Основное количество мышьяка находится в остаточной форме (81–88%) и всего лишь 1.5–3.4% в ионообменной. На миграцию мышьяка оказывает влияние pH окружающей среды. Техногенные пески характеризуются как сильнокислые. В кислой и слабокислой среде мышьяк отличается слабой подвижностью [20]. Разницы в распределении мышьяка по геохимическим формам в зависимости от глубины залегания техногенных песков и гранулометрического состава не наблюдается.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования показали, что валовые содержания Cu, Zn, Pb, Ni превышают ПДК в техногенных песках. Превышение нормативов свидетельствует о вредном воздействии отходов обогащения сульфидсодержащих руд на окружающую среду.

Из полученных данных по содержанию и распределению элементов по гранулометрическому составу в техногенных песках следует: независимо от глубины их залегания содержание каждого из элементов в пылевой фракции (<0.16 мм) превышает их количество в более крупных гранулометрических фракциях.

Распределение элементов по геохимическим формам выявило, что ионообменная форма элементов активно выщелачивается из пылевых и мелких фракций песков. Подвижности элементов способствует высокая кислотность отходов хвостохранилища сульфидсодержащих руд.

Таким образом, результаты исследований свидетельствуют об экологической опасности мелкой фракции хвостов обогащения сульфидсодержащих руд вследствие растворения подвижных форм загрязняющих элементов в дренажных водах и их попадания в грунтовые воды, почвы и растительные объекты.

Автор благодарен к.г.-м.н. **О.К. Смирновой** за предоставленные пробы и выражает свою признательность специалистам лаборатории инструментальных методов анализа за качественное выполнение исследований химического состава проб. Исследование выполнено в рамках государственного задания ГИН СО РАН по проекту № АААА-А21-121011890033-1 “Геоэкологические риски и экстремальные природные явления Сибири

и Дальнего Востока”; работа проведена с использованием оборудования Центра коллективного пользования “Геоспектр” ГИН СО РАН (Улан-Удэ, Россия).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абрамов Б.Н., Еремин О.В., Филенко Р.А., Цыренов Т.Г.* Оценка потенциальной опасности природно-техногенных комплексов рудных месторождений (Восточное Забайкалье, Россия) // Геосферные исследования. 2020. № 2. С. 64–75.
2. *Вдовина О.К., Лаврусевич А.А., Мелентьев Г.Б. и др.* Химический состав фракций обломочного материала горнопородных отвалов и хвостохранилищ как основа потенциальной геоэкологической опасности районов деятельности горнорудных предприятий // Вестник МГСУ. Сер. Безопасность строительных систем. Экологические проблемы в строительстве. Геоэкология. 2014. № 12. С. 152–161.
3. *Вековищина С.А., Клейн С.В., Ханхареев С.С. и др.* Оценка качества среды обитания и рисков для здоровья населения г. Закаменск – территории длительного хранения отходов Джидинского вольфрам-молибденового комбината // Гигиена и санитария. 2017. № 1. Т. 96. С. 15–20.
4. *Гордиенко И.В., Гороховский Д.В., Ланцева В.С., Бадмацзыренова Р.А.* Джидинский рудный район: строение, металлогения, геодинамика, перспективы развития // Известия Сибирского отделения секции наук о Земле РАЕН. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых. 2017. № 1. Т. 40. С. 9–31.
5. *Горячев А.А., Красавцева Е.А., Лащук В.В. и др.* Оценка экологической опасности и возможности переработки хвостов обогащения лопаритовых руд // Экология и промышленность России. 2020. № 12. Т. 24. С. 46–51.
6. *Дампилова Б.В., Дорошкевич С.Г., Смирнова О.К., Федотов П.С.* Динамическое экстрагирование элементов из почв техногенных ландшафтов // Геоэкология. 2021. № 3. С. 88–94.
7. *Дампилова Б.В., Федотов П.С., Дженлода Р.Х. и др.* Сравнительное изучение методов оценки подвижности форм элементов в загрязненных почвах и техногенных песках в условиях статического и динамического экстрагирования // Журнал аналитической химии. 2017. № 10. Т. 72. С. 944–951.
8. *Дорошкевич С.Г., Смирнова О.К., Дампилова Б.В., Гайдашев В.В.* Оценка состояния почв и растительности г. Закаменска (Бурятия): последствия деятельности Джидинского вольфрам-молибденового комбината // Геоэкология. 2016. № 5. С. 369–383.
9. *Дьяченко А.Н., Иванков С.И., Крайденко Р.И. и др.* Технология обогащения лежалых хвостов вольфрамсодержащих песков // Известия высших учебных заведений. Физика. 2014. № 11. Т. 57. С. 245–248.
10. *Зайцева Н.В., Май И.В., Клейн С.В. и др.* Научно-методические аспекты и практический опыт формирования доказательной базы причинения вреда здоровью населения в зоне влияния отходов прошлой экономической деятельности // Гигиена и санитария. 2017. № 1. Т. 96. С. 1038–1044.
11. *Иванов Д.В., Валиев В.С., Зиганшин И.И. и др.* Структурная взаимосвязь гранулометрического состава, содержания органического вещества и тяжелых металлов в донных отложениях // Российский журнал прикладной экологии. 2020. № 2. С. 23–30.
12. *Клейн С.В., Вековищина С.А., Балашов С.Ю., Кокоулина А.А.* Пространственный анализ в задаче

- формирования доказательной базы вреда здоровью при воздействии факторов среды обитания // Здоровье населения и среда обитания – ЗНИСО. 2017. № 10. С. 9–13.
13. Красавцева Е.А. Геоэкологическая оценка влияния отходов обогащения редкометалльных руд на окружающую среду (на примере ООО “Ловозерский ГОК”): автореф. дис....канд. техн. наук. М., 2022. 26 с.
  14. Красавцева Е.А., Максимова В.В., Маслобоев В.А. др. Моделирование взаимодействия тонкой фракции хвостов обогащения лопаритовых руд с почвенными водами // Экология и промышленность России. 2021. № 4. Т. 25. С. 28–33.
  15. Крупская Л.Т., Орлов А.М., Голубев Д.А. и др. Оценка экологической опасности накопленных отходов переработки минерального сырья закрытых горных предприятий в Приамурье и Приморье // Горные науки и технологии. 2020. № 3. Т. 5. С. 208–223.
  16. Куликова Е.В., Горбунова Н.С., Санеева Ю.Н. Геохимические особенности поведения ТМ в техногенных ландшафтах // Модели и технологии природообустройства (региональный аспект). 2023. № 1. С. 37–43.
  17. Павлова Л.М. Влияние разных способов отработки золоторудных месторождений на биогеохимическую подвижность химических элементов (на примере месторождений Приамурья) // Проблемы региональной экологии. 2022. № 6. С. 14–20.
  18. Панов А.В., Трапезников А.В., Коржавин А.В. и др. Тяжелые металлы и мышьяк в почвах района размещения промышленных предприятий и атомной электростанции (на примере Белоярской АЭС) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг ресурсов. 2022. Т. 333. № 7. С. 126–136.
  19. Поляк Ю.М., Шигаева Т.Д., Кудрявцева В.А., Конаков В.Г. Влияние гранулометрического состава донных отложений на подвижность и токсичность тяжелых металлов в прибрежной зоне финского залива Балтийского моря // Вода: химия и экология. 2017. № 1. С. 11–18.
  20. Путилина В.С., Галицкая И.В., Юганова Т.И. Поведение мышьяка в почвах, горных породах и подземных водах. Трансформация, адсорбция / десорбция, миграция. Новосибирск: ГПНТБ СО РАН, 2011. 249 с.
  21. Радомская В.И., Павлова Л.М. Оценка степени подвижности элементов в техногенных грунтах хвостохранилища Токурской золотоизвлекательной фабрики по результатам модельных экспериментов // Разведка и охрана недр. 2019. № 6. С. 55–63.
  22. Раковская Е.Г., Рудов М.Е., Прохоров А.С. Исследование загрязнения почв тяжелыми металлами // Вестник МАНЭБ. 2020. № 1. Т. 25. С. 13–17.
  23. Рыльникова М.В., Радченко Д.Н., Цупкина М.В., Курков А.Е. Оценка воздействия техногенных образований из отходов переработки многокомпонентных руд на экосистемы горнопромышленных регионов // Известия Тульского гос. университета. Науки о Земле. 2020. № 3. С. 5–17.
  24. СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания. п. IV. Почва населенных мест и сельскохозяйственных угодий. Предельно допустимые концентрации (ПДК) и ориентировочно допустимые концентрации (ОДК) химических веществ в почве. М: ЦЕНТРМАГ, 2021. 736 с.
  25. Смирнова О.К., Плюснин А.М. Джидинский рудный район (проблемы состояния окружающей среды). Улан-Удэ: БНЦ СО РАН, 2013. 181 с.
  26. Цыдыпов В.В., Жамсуева Г.С., Заяханов А.С. и др. Влияние техногенных песков хвостохранилищ Джидинского вольфрамо-молибденового комбината на содержание мелкодисперсной и субмикронной фракции аэрозоля в атмосфере города Закаменск // Успехи современного естествознания. 2019. № 4. С. 81–86.
  27. Шартова Н.В., Энх-Амгалан С., Малхазова С.М. Здоровье населения урбанизированных территорий республики Бурятия и Монголии // География и природные ресурсы. 2019. № 5. С. 192–196.
  28. Янин Е.П. Особенности распределения химических элементов в различных гранулометрических фракциях атмосферного аэрозоля // Экологическая экспертиза. 2021. № 3. С. 104–117.
  29. Falta T., Limbeck A., Koellensperger G., Hann S. Bioaccessibility of selected trace metals in urban PM2.5 and PM10 samples: a model study // Analytical and Bioanalytical Chemistry. 2008. V. 390. P. 1149–1157.
  30. Martin R., Dowling K., Pearce D.C. et al. Size-dependent characterisation of historical gold mine wastes to examine human pathways of exposure to arsenic and other potentially toxic elements // Environ. Geochem. Health. 2016. V. 38. N 5. P. 1097–1114.
  31. Tessier A., Campbell P., Bisson M. Sequential extraction procedure for the speciation of the particulate trace metals // Anal. Chem. 1979. V. 51. P. 844–851.
  32. Whalley C., Grant A. Assessment of the phase selectivity of the European Community Bureau of Reference (BCR) sequential extraction procedure for metals in sediment // Analytica Chimica Acta. 1994. T. 291(3). P. 287–295.

## HEAVY METALS AND THEIR FORMS OF OCCURRENCE IN SULFIDE-CONTAINING ORE BENEFICIATION WASTE (BURYATIA)

**B. V. Dampilova<sup>1,#</sup>**

<sup>1</sup>*Dobretsov Geological Institute, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,  
ul. Sakhyanovoi 6a, Ulan-Ude, 670047 Russia*

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

The extraction and beneficiation of tungsten-molybdenum ores in the Dzhida ore district (Buryatia) were carried out for several decades. Sulfide-containing production waste in the form of technogenic sands with a total volume of more than 40 million tons has been accumulated over the years of the operation of processing plants. The tailings dumps are adjacent directly to the territory of Zakamensk town. Currently,

the technogenic sand continues to pose a threat to the health of urban population and the environment. In this regard, the content of W, Mo, As, Fe, Mn, S and heavy metals (Cu, Zn, Ni, Pb) were determined in the technogenic sands. The content of Cu exceeds its permissible concentrations by 3.3–9.7 times, Zn exceeds by 4.2–10.9 times and Pb, by 5.5–25 times. The distribution of elements by grain size and along the vertical section of the tailings dump was studied. The forms of element occurrence were determined by geochemical forms. To find the elements forms, we used a five-stage sequential BCR extraction scheme in static mode. The standard sample BCR-701 was analyzed along with the studied samples. The results obtained indicate the influence of particle-size distribution on the content and mobility of elements. The ion-exchange form of elements is actively leached from dust and fine sand fractions. The mobility of elements from technogenic sands is also facilitated by high acidity of waste sulfide-containing ores. The pH of the water extract of technogenic sands is 3.3–6.8. Exceeding the maximum permissible concentrations of mobile forms of elements was revealed for Pb by up to 15.8 times, for Zn by 3.9 times, and for Cu up to 2.5–9.5 times. The nickel content in enrichment waste is lower than that required by regulatory documents. The studied technogenic sands contain fairly high amounts of Fe and Mn mobile forms, which are in the range of 83–112 mg/kg and 200–335 mg/kg, respectively. However, their values do not exceed standard quantities. Thus, the research results indicate that standards are exceeded and that ore waste has a harmful effect on the environment (Cu, Zn, Pb, Ni).

**Keywords:** heavy metals, forms of occurrence, migration, sulfide-containing waste, technogenic sand, particle-size distribution

## REFERENCES

1. Abramov, B.N., Eremin, O.V., Filenko, R.A., Tsyrenov, T.G. [Assessment of the potential hazard of natural and technogenic complexes of ore deposits (Eastern Transbaikalia, Russia)]. *Geosfernye issledovaniya*, 2020, no. 2, pp. 64–75. (in Russian)
2. Vdovina, O.K., Lavrusevich, A.A., Melent'ev, G.B. et al. [The chemical composition of the fractions of clastic matter in mining and tailing dumps as the basis for the potential geoecological hazard of mining enterprises' operation areas]. *Vestnik MGSU, Seriya Bezopasnost stroitel'nykh sistem, Ekologicheskie problemy v stroitel'stve, Geoekologiya*, 2014, no. 12, pp. 152–161. (in Russian)
3. Vekovshinina, S.A., Klein, S.V., Khankhareev, S.S., Makarova, L.V. et al. [Assessment of habitat quality and risks to the population health in Zakamensk, the territory of long-term waste storage of the Dzhidinsky tungsten-molybdenum combine]. *Gigiena i sanitariya*, 2017, no. 1, vol. 96, pp. 15–20. (in Russian)
4. Gordienko, I.V., Gorokhovskii, D.V., Lantseva, V.S., Badmatsyrenova, R.A. [Dzhidinsky ore district: structure, metallogeny, geodynamics, and development prospects]. *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya seksii nauk o Zemle RAEN, Geologiya, razvedka i razrabotka mestorozhdenii poleznykh iskopayemykh*, 2017, no. 1, vol. 40, pp. 9–31. (in Russian)
5. Goryachev, A.A., Krasavtseva, E.A., Lashchuk, V.V. et al. [Assessment of environmental hazards and the possibility of processing tailings of loparite ore beneficiation]. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*, 2020, no. 12, vol. 24, pp. 46–51. (in Russian)
6. Dampilova, B.V., Doroshkevich, S.G., Smirnova, O.K., Fedotov, P.S. [Dynamic extraction of elements from soils of technogenic landscapes]. *Geoekologiya*, 2021, no. 3, pp. 88–94. (in Russian)
7. Dampilova, B.V., Fedotov, P.S., Dzheloda, R.Kh. et al. [Comparative study of methods for assessing the mobility of element forms in contaminated soils and technogenic sands under conditions of static and dynamic extraction]. *Zhurnal analiticheskoi khimii*, 2017, no. 10, vol. 72, pp. 944–951. (in Russian)
8. Doroshkevich, S.G., Smirnova, O.K., Dampilova, B.V., Gaidashev, V.V. [Assessment of the state of soils and vegetation in Zakamensk (Buryatia): consequences of the Dzhidinsky tungsten-molybdenum plant operation]. *Geoekologiya*, 2016, no. 5, pp. 369–383. (in Russian)
9. Dyachenko, A.N., Ivankov, S.I., Kraidenko, R.I. et al. [Technology of beneficiation of stale tailings of tungsten-containing sands]. *Izvestiya vuzov. Fizika*, 2014, vol. 57, no. 11, pp. 245–248. (in Russian)
10. Zaitseva, N.V., Mai, I.V., Klein, S.V. et al. [Scientific and methodological aspects and practical experience in the formation of evidence base for harm to public health in the zone of influence of waste from past economic activity]. *Gigiena i sanitariya*, 2017, no. 1, vol. 96, pp. 1038–1044. (in Russian)
11. Ivanov, D.V., Valiev, V.S., Ziganshin, I.I. et al. [Structural relationship of granulometric composition, organic matter content and heavy metals in bottom sediments]. *Rossiiskii zhurnal prikladnoi ekologii*, 2020, no. 2, pp. 23–30. (in Russian)
12. Klein, S.V., Vekovshinina, S.A., Balashov, S.Yu., Kokouline, A.A. [Spatial analysis in the problem of forming evidence base of harm to health under the influence of environmental factors]. *Zdorov'e naseleniya i sreda obitaniya –ZNISO*, 2017, no. 10, pp. 9–13. (in Russian)
13. Krasavtseva, E.A. [Geoecological assessment of the impact of rare metal ore beneficiation waste on the environment (by the example of Lovozerskii GOK)]. Extended abstract of Cand. Sci. (Techn.) Diss., Moscow, 2022, 26 p. (in Russian)
14. Krasavtseva, E.A., Maksimova, V.V., Masloboev, V.A. et al. [Modeling of the interaction of fine fraction of loparite ore beneficiation tailings with soil waters]. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*, 2021, vol. 25, no. 4, pp. 28–33. (in Russian)
15. Krupskaya, L.T., Orlov, A.M., Golubev, D.A. et al. [Assessment of the environmental hazard of accumulated waste from processing of mineral raw materials at closed mining enterprises in the Amur region and Primorye]. *Gornye nauki i tekhnologii*, 2020, no. 3, vol. 5, pp. 208–223. (in Russian)
16. Kulikova, E.V., Gorbunova, N.S., Saneeva, Yu.N. [Geochemical features of HM behavior in technogenic landscapes]. *Modeli i tekhnologii prirodoobustroistva (regional'nyi aspekt)*, 2023, no. 1, pp. 37–43. (in Russian)
17. Pavlova, L.M. [The influence of different methods of mining gold deposits on the biogeochemical mobility of chemical elements (by the example of deposits in the Amur region)]. *Problemy regional'noi ekologiy*, 2022, no. 6, pp. 14–20. (in Russian)

18. Panov, A.V., Trapeznikov, A.V., Korzhavin, A.V. et al. [Heavy metals and arsenic in soils of the location area of industrial enterprises and nuclear power plants (on the example of the Beloyarsk NPP)]. *Izvestiya Tomskogo Polytekhnicheskogo Universiteta. Inzhiniring resursov*, 2022, no. 7, vol. 333, pp. 126–136. (in Russian)
19. Polyak, Yu.M., Shigaeva, T.D., Kudryavtseva, V.A., Konakov, V.G. [Influence of grain-size distribution of sediments on the mobility and toxicity of heavy metals in the coastal zone of the gulf of Finland]. *Voprosy ekologii*, 2017, no. 1, pp. 11–18. (in Russian)
20. Putilina, V.S., Galitskaya, I.V., Yuganova, T.I. [Behavior of arsenic in soils, rocks and groundwater. Transformation, adsorption / desorption, migration]. Novosibirsk, GPNTB SO RAN, 2011. 249 p. (in Russian)
21. Radomskaya, V.I., Pavlova, L.M. [Assessment of the mobility degree of elements in technogenic soils of tailings dump at the Tokur gold extraction plant based on the results of model experiments]. *Razedka i okhrana nedr*, 2019, no. 6, pp. 55–63. (in Russian)
22. Rakovskaya, E.G., Rudov, M.E., Prokhorov, A.S. [Study of soil pollution with heavy metals]. *Vestnik MANEB*, 2020, no. 1, vol. 25, pp. 13–17. (in Russian)
23. Ryl'nikova, M.V., Radchenko, D.N., Tsupkina, M.V., Kirkov, A.E. [Assessment of the impact of technogenic formations from the multicomponent ore processing waste on the ecosystems in mining regions]. *Izvestiya Tul'skogo gos. universiteta. Nauki o Zemle*, 2020, no. 3, pp. 5–17. (in Russian)
24. [SanPiN 1.2.3685-21. Hygienic standards and requirements for ensuring the safety and (or) harmlessness of environmental factors for humans. p. IV. Soil of populated areas and agricultural lands. Maximum permissible concentrations (MPC) and approximately permissible concentrations (APC) of chemicals in the soil]. Moscow, TsentrMag Publ., 2021, 736 p. (in Russian)
25. Smirnova, O.K., Plyusnin, A.M. [Dzhidinskii ore district (environmental issues)]. Ulan-Ude, BNTs SO RAN, 2013, 181 p. (in Russian)
26. Tsydygov, V.V., Zhamsueva, G.S., Zayakhanov, A.S. et al. [The influence of technogenic sands from the tailings of the Dzhidinskii tungsten-molybdenum plant on the content of fine and submicron aerosol fractions in the atmosphere of the city of Zakamensk]. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*, 2019, no. 4, pp. 81–86. (in Russian)
27. Shartova, N.V., Enkh-Amgalan, S., Malkhazova, S.M. [Population health in urbanized territories of the Republic of Buryatia and Mongolia]. *Geografiya i prirodnye resursy*, 2019, no. 5, pp. 192–196. (in Russian)
28. Yanin, E.P. [Features of the distribution of chemical elements in various granulometric fractions of atmospheric aerosol]. *Ekologicheskaya ekspertiza*, 2021, no. 3, pp. 104–117. (in Russian)
29. Falta, T., Limbeck, A., Koellensperger, G., Hann, S. Bioaccessibility of selected trace metals in urban PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> samples: a model study. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2008, vol. 390, pp. 1149–1157.
30. Martin, R., Dowling, K., Pearce, D.C. et al. Size-dependent characterisation of historical gold mine wastes to examine human pathways of exposure to arsenic and other potentially toxic elements. *Environ Geochem Health*, 2016, no. 5, vol. 38, pp. 1097–1114.
31. Tessier, A., Campbell, P., Bisson, M. Sequential extraction procedure for the speciation of the particulate trace metals. *Anal. Chem.*, 1979, vol. 51, pp. 844–851.
32. Whalley, C., Granvol, A. Assessment of the phase selectivity of the European Community Bureau of Reference (BCR) sequential extraction procedure for metals in sediment. *Analytica Chimica Acta*, 1994, vol. 61, pp. 2211–2221.

УДК 504.064.47

## ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ И ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПОРОД ЗОНЫ АЭРАЦИИ, ЗАГРЯЗНЕННЫХ УГЛЕВОДОРОДАМИ

© 2024 г. К. Л. Чертес<sup>1,\*</sup>, А. А. Лаврусевич<sup>2,3</sup>, В. Н. Пыстин<sup>1</sup>,  
О. В. Тупицына<sup>1</sup>, А. Д. Пашков<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»,  
ул. Молодогвардейская 244, Самара, 443100 Россия

<sup>2</sup>Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России, ул. Давыдовская 7, Москва, 121352 Россия

<sup>3</sup>Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе,  
ул. Миклухо-Маклая 23, Москва, 117997 Россия

\*E-mail: rector@samgtu.ru

Поступила в редакцию 10.04.2024 г.

После доработки 08.07.2024 г.

Принята к публикации 28.10.2024 г.

Предложено классифицировать области загрязненных грунтов на территориях предприятий нефтяного комплекса и применяемые методы удаления углеводородов в зависимости от глубин. Разработан и внедрен в строительную практику набор технологий, позволяющих проводить на территориях реконструируемых и ликвидируемых объектов нефтяного комплекса удаление углеводородсодержащих загрязнений без извлечения грунтов. Представлены элементы технологической схемы очистки грунтов для различных условий залегания углеводородных загрязнений.

**Ключевые слова:** *загрязненные породы зоны аэрации, комплекс нефтяной, очистка грунтов, показатели геомеханические, обработка биотермическая*

DOI: 10.31857/S0869780924060096 EDN: ALQTFK

### ВВЕДЕНИЕ

На территориях предприятий нефтяного комплекса практически вся геологическая среда загрязнена углеводородами. Загрязнение распространяется не только на почвы, но и на грунты пород зоны аэрации, подземные и поверхностные воды в ареале влияния предприятия. Известно, что нефтяные загрязнения из сооружений проникают в породы зоны аэрации до глубин региональных водоупоров, составляющих, в отдельных случаях, десятки метров [6].

Одним из распространенных направлений удаления нефтяных загрязнений из грунтов выступает очистка методом промыва [9, 10, 13]. В основном, таким образом очищают верхние горизонты пород зоны аэрации, глубиной не более 3.0 м. Как правило, в этот элемент входят почвы и подстилающие их породы. Между тем, новое строительство на существующих нефтяных предприятиях охватывает глубины значительно большие, чем толщина грунта. Например, ростверк фундаментов установок каталитического риформинга на площадках реконструкции нефтеперерабатывающих

заводов (НПЗ) в отдельных случаях составляет более 10.0 м.

В большинстве случаев, перед строительством, загрязненные грунты экскавируют, формируют на поверхности в виде штабелей, буртов, гряд, слоев для последующей очистки от остаточных углеводородов биохимическим или химическим методами [1, 14]. На время обработки загрязненные грунты превращаются в отход. Строительная организация вынуждена осуществлять платежи за обращение с опасным отходом. Эти платежи сопоставимы со стоимостью строительства отдельных объектов на стройплощадке.

На глубинах более 3.0 м биодеструкция грунта затруднена и более целесообразно применение химических и физико-химических методов очистки загрязненных пород зоны аэрации [5].

Перед специалистами стоит проблема, очерчиваемая следующим кругом вопросов:

– можно ли использовать нефтезагрязненные грунты в качестве строительных оснований, с проведением очистных мероприятий без извлечения пород?

– при каких остаточных содержаниях нефтепродуктов в грунтовых основаниях можно осуществлять строительные работы?

– какие геоэкологические и геомеханические показатели, а также диапазоны их значений регламентируют возможность использования нефтезагрязненных грунтов в качестве строительных оснований?

– какие методы удаления загрязнений из пород зоны аэрации целесообразно использовать на освоенных строительством территориях, не нарушая сплошность пород, т.е. без экскавации, которая превращает грунт в отход?

## МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Авторами предложено классифицировать области загрязненных пород зоны аэрации и применяемые методы удаления углеводородов в зависимости от глубин:

– <1.0 м – **I аэробная подобласть**; целесообразно применение, в основном, биохимического метода очистки; обеспечиваются естественные условия “кислородного дыхания” микрофлоры-редуцента притоком из атмосферы;

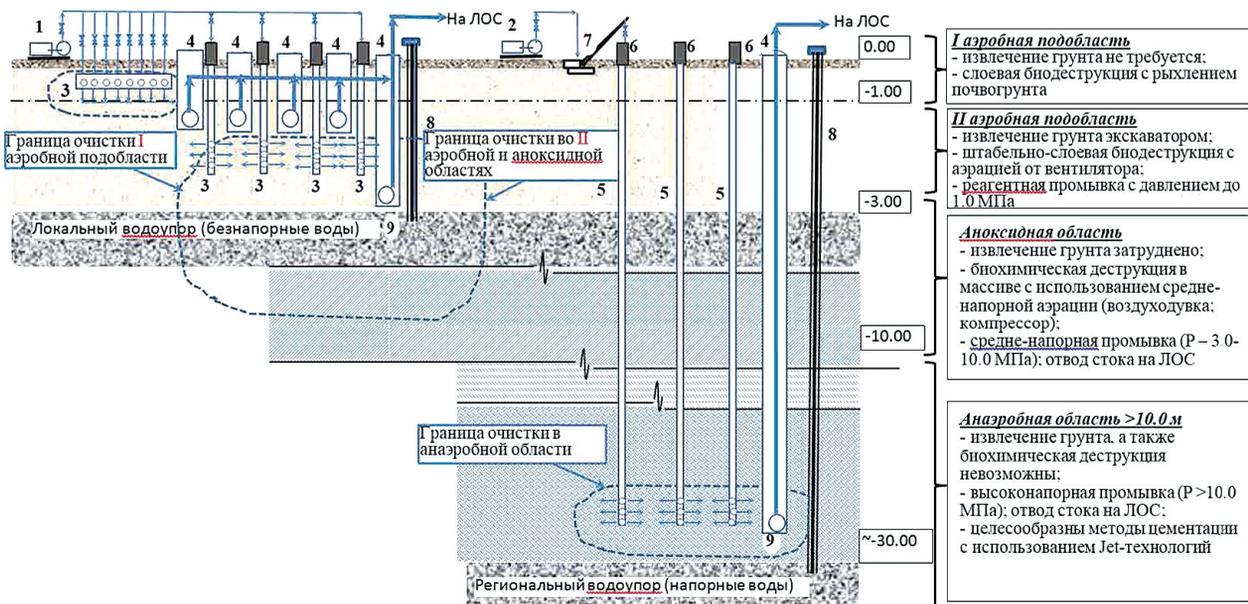
– 1.0–3.0 м – **II аэробная подобласть**; целесообразно сочетание методов как биохимической, так и химической очистки; “кислородное дыхание” обеспечивается принудительным способом с использованием или рыхлительной техники

или низконапорной аэрации от вентилятора (давление воздуха до 0.6 атм); до глубины 3,0 м возможно применение физико-химических методов очистки или пропарки с флокулянтном под давлением нагнетания раствора до 1.0 атм;

– 3.0–10.0 м – **аноксидная область**; здесь доступ кислорода с поверхности затруднен; энергообмен обеспечивается за счет “нитритного” и “нитратного” дыхания микрофлоры; целесообразно применение средненапорной аэрации от воздухоудвки или компрессора с давлением от 0.6 до 2.0 атм; подача промывочного раствора для химочистки возможна в диапазоне давлений от 1.0 до 10.0 атм;

– >10.0 м – **анаэробная область**; биодеструкция загрязнений нецелесообразна; очистка обеспечивается высоконапорными физико-химическими методами под давлением более 10 атм. В отдельных случаях применяют методы подачи промывочных растворов под давлением 100 атм и более, направленные на изменение фильтрационно-реологических свойств загрязненной горной породы, улучшение её проницаемости и снижение вязкости загрязнений неньютоновской природы.

На территории одного из реконструируемых НПЗ Среднего Поволжья при участии авторов был запроектирован и частично построен комплекс очистки пород зоны аэрации от застарелых нефтяных загрязнений. Технологическая схема и отдельные узлы комплекса, применительно



**Рис. 1.** Элементы технологической схемы очистки грунтов для различных условий залегания углеводородных загрязнений. 1 – насосная группа низкого давления; 2 – насосная группа высокого давления; 3 – промывные дрены; 4 – колодцы сбора загрязненного промывочного раствора; 5 – нагнетательно-добывающие скважины; 6 – превенторы; 7 – передвижной высоконапорный экструдер (Jet – нагнетатель); 8 – композитный шпунт геотехнической защиты, прорезанный до водоупора; 9 – погружной насос.

(a)



(б)



(в)



(г)



**Рис. 2.** Отдельные узлы сооружений высоконапорной реагентной очистки пород от углеводородных загрязнений: а – площадка нагнетательно-добывающих скважин с превенторами; б – высоконапорная насосная станция с реагентным хозяйством; в – узел приготовления раствора реагентов; г – передвижной высоконапорный экструдер (Jet – нагнетатель).

к различным областям загрязненных грунтов, представлены на рис. 1 и 2.

Оценку нефтезагрязненных грунтов, как оснований и источников деградации пород проводили на территориях существующих предприятий нефтяного комплекса в ходе проектно-изыскательских работ по подготовке площадок к новому строительству.

Типы предприятий нефтяной отрасли, на которых производили грунтоотбор и анализ, а также

отдельные характеристики загрязненных грунтов, представлены в табл. 1.

Исследуемые параметры объединены в группы: геомеханическую и геоэкологическую (табл. 2 и 3). Причем, в геомеханической группе сделан упор на несущую способность загрязненных грунтов, а в экологическую группу – параметры реологии и фильтрации грунтов, определяющие возможность их высоконапорного промыва.

**Таблица 1.** Сведения по загрязненности грунтов на предприятиях нефтяной отрасли

Отрасль	Тип предприятия/ объект	Виды деятельности, связанной с извлечением загрязненного грунта	Основные виды нефтезагрязненных пород / глубина загрязнения, обнаруженная при бурении, м	Диапазон содержания нефтепродуктов, % масс. грунта
Добыча	Месторождение/ резервуарный парк	Капремонт резервуарных парков	Пески / до 3.0	0.15–0.25
	Месторождение / буллитная	Реконструкция оборудования	Глины / до 5.0	0.40–0.50
	Месторождение / УПН	Снос старого оборудования	Карбонатные / до 5.0	0.50–0.70
Транспорт	Нефтепровод / порыв на линейном участке	Замена участка трубопровода	Глины – суглинки / до 2.0	0.5–1.0
	Продуктопровод / насосная	Объектный демонтаж старой насосной	Карбонатные / до 3.0	1.0–2.0
Переработка (включая нефтехимию)	НПЗ / резервуарный парк	Реконструкция площадки завода	Пески-глины / до 12.0	2.0–3.0
	НПЗ / цех каталитического крекинга	Объектный демонтаж старых установок	Пески-глины – карбонатные / до 30.0	2.0–3.0
	НХК / установка изобутилена	Расширение мощности со сносом старых установок	Глины / до 15.0	0.5–1.0
Обращение с отходами	Нефтешламо-накопитель	Реконструкция шламонакопителя с расширением рабочих карт	Нефтешламы с песками / до 30.0	5.0–10.0
	Аварийный амбар	Ликвидация амбара	Нефтешламы с суглинками / до 10.0	3.0–8.0
	Буферный пруд	Частичная ликвидация с реконструкцией насосной	Нефтешламы с песками/ до 10.0	5.0–15.0
	Шламовый амбар	Ликвидация и рекультивационные работы	Буровые шламы с торфом/ до 10.0	<0.05

Были проведены исследования по очистке различных горизонтов нефтезагрязненных пород с использованием флокулянтов марок О-БИС, Флокатор 200, Праестол 853, Nalco 4757 и Юниклин.

Дозировка флокулянтов лежала в границах  $4.0 \pm 0.5$  мг/кг обрабатываемого грунта. В отдельные образцы грунта наряду с флокулянтом вводили соду и карбонизированную воду [12]. Давление нагнетания промывного раствора регулировали в диапазоне от  $1.0 \pm 0.2$  до  $40.0 \pm 1.0$  МПа.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Исследования показали, что нефтезагрязненные грунты отличает многообразие видового состава, геомеханических свойств и экологических показателей. Соответственно разнообразно

и количество направлений ликвидации загрязнений в грунтах.

Очистка грунтов — сложный и дорогостоящий процесс. Для ее реализации требуется обеспечить максимальную поверхность контакта реагентных растворов с загрязненными породами высокой вязкости и низкой проницаемости, расположенными на глубинах в десятки и на расстоянии в сотни метров от источников загрязнений.

Нефтезагрязненные инфильтраты, проникающие в породы зоны аэрации, представляют собой вязкие жидкости по состоянию близкие к неньютоновским. Низкая проницаемость среды (до  $10-14 \text{ м}^2$ ), высокая вязкость жидких флюидов, заполняющих её поры (до 100 Па·с), создают сопротивление потоку промывочных растворов и не позволяют им равномерно распределяться по всей толще, начиная от поверхности загрязненных

грунтов до отметок региональных водоупоров. В связи с этим потребовалась разработка методов высоконапорной подачи промывочных растворов, способных, наряду с очисткой от загрязнений, изменить фильтрационно–реологические свойства грунтов в сторону увеличения их проницаемости и снижения вязкости загрязнителей.

При высоконапорном воздействии очищаемые от нефтяных загрязнений грунты, особенно на глубинах заложения фундаментов, не должны терять несущую способность, как основания для строительства.

Отдельное внимание при разработке опытно–промышленных испытаний и внедрении перечисленных выше технологий уделялось изучению влияния ряда абиотических факторов среды, а также управляющих параметров (исходного содержания углеводородов, рабочих доз реагентов и добавок, давлений нагнетания промывочных и вяжущих растворов) на деформационные и экологические показатели грунтов, как потенциальных оснований для строительства.

Исследования показали, что содержание углеводородов в нефтезагрязненных грунтах в диапазоне значений 1.0–5.0 мас. % (10000–50000 мг/кг) не приводит к существенному понижению модуля деформации, если образец находится в состоянии монолита. Диапазоны значений модуля деформации для образцов глин (влажность 25.87%) и песков с пылеватыми включениями (влажность 38.61%) составили  $(7.0–38.0) \pm 1.0$  МПа и  $(4.0–25.0) \pm 1.0$  МПа соответственно. Подобные значения обеспечивают несущую способность нефтезагрязненных грунтов и их последующее использование в качестве оснований под объекты капитального строительства. Аналогичные результаты были получены для показателей удельного сцепления грунтов:  $(28.0–60.0) \pm 1.0$  кПа – глины, и  $(2.0–6.0) \pm 1.0$  кПа – пески.

Снижение несущей способности нефтезагрязненных оснований происходит из–за ослабления межагрегатных связей в скелете грунта и начинает проявляться при достижении содержания углеводородов более 5 мас. % ( $>50000$  мг/кг). По всей видимости, углеводородные инфильтраты в поровом пространстве оснований с содержанием нефтепродуктов  $>5$  мас. % определяют текучую консистенцию грунтов. При этом происходит снижение угла внутреннего трения и удельного сцепления, изменяется сжимаемость грунтов, особенно в водонасыщенных глинах и песках с преобладанием пылеватых частиц [8].

Учитывая значимость проблемы, авторами был разработан и внедрен в строительную практику набор технологий, позволяющих проводить на территориях реконструируемых и ликвидируемых объектов нефтяного комплекса удаление углеводородсодержащих загрязнений, без извлечения грунтов из выемок. К ним относятся:

– удаление из загрязненных почв до глубин 1.0 м летучих фракций углеводородов методом газоконтактной продувки [7];

– удаление углеводородов из загрязненных грунтов и нефтеотходов в верхних горизонтах пород зоны аэрации (до глубин 3.0 м) с использованием биотермических методов [11];

– иммобилизация нефтяных загрязнений на глубинах до 10.0 м, путем закачки в грунты растворов реагентов, обладающих вяжущими, флокулирующими и сорбционными свойствами [15];

– очистка нефтезагрязненного грунта на глубине более 10 м с использованием высоконапорной закачки растворов, содержащих углекислоту (Jet–технология) [15].

В I аэробной подобласти на глубине до 1.0 м ликвидацию углеводородных загрязнений возможно проводить, как правило, без экскавации грунтов. Здесь рекомендуется применение методов аэробной биохимической деструкции аборигенными или искусственно созданными микроорганизмами–редуцентами; производят рыхление, мульчирование грунта и после обезвреживания его укатку.

При ликвидации нефтяных загрязнений во II аэробной подобласти (1.0–3.0 м), а также в аноксидной области (до 10.0 м) возможно производить экскавацию грунта, его формирование в штабели или бурты с последующей биотермической обработкой. Аэрацию извлеченного грунта целесообразно обеспечивать перемешиванием ковшом или непосредственно от воздуходувных устройств. После обезвреживания возможен возврат грунтов в котлован в качестве вторичных рекультивационных материалов. Также на глубинах до 10.0 м имеет смысл использовать низконапорный дренажный промыв нефтезагрязнений [2–4].

Ликвидация загрязнений на значительных глубинах (более 10.0 м) сопряжена с необходимостью применения высоконапорной очистки.

Очисткой были охвачены загрязненные горизонты под площадками трех НПЗ Среднего Поволжья. Здесь в период 2009–2018 гг. проводили полную реконструкцию технологических установок для последующего выпуска топлив марок Евро–5. На двух НПЗ провели объектный монтаж бездействующих и морально изношенных установок, извлечение фундаментов в горизонтах отметок  $(–2.50) – (20.0)$  и частичную экскавацию нефтезагрязненных грунтов с последующей заменой привозными грунтами. На одном НПЗ произвели снос старых установок в отметках  $(0.00) – (–3.00)$ . Строительство произвели на загрязненных грунтах, так как их геомеханические характеристики отвечали требованиям к производству работ.

Таблица 2. Геомеханические свойства различных типов нефтезагрязненных грунтов и шламов (по данным инженерных изысканий)

№ п/п	Наименование породы (ИГЭ)	Геомеханические и отдельные структурные показатели							Число пластичности $I_p$
		Коэффициент пористости, $\epsilon$	Диапазон линейных размеров частиц, мм	Модуль деформации $E$ , МПа	Сцепление, $C$ , кПа	Плотность, $\rho$ , т/м <sup>3</sup> (при влажности до 30%)	Показатель текучести, $I_f$		
1	Песок мелкий/пылеватый с содержанием нефтепродуктов до 0.5 мас. %	0.6–0.7	0.1–1.0	20–30	–	1.65–1.70	–	–	
2	Песок мелкий с содержанием нефтепродуктов 0.5–1.0 мас. %	0.5–0.6	0.5–3.0	30–40	9.0–11.0	1.65–1.70	–	–	
3	Песок мелкий с содержанием нефтепродуктов $\geq 1.0$ мас. %	0.4–0.5	0.5–3.0	40–50	12.0–15.0	1.6–1.65	–	1.0–3.0	
4	Глина твердая с содержанием нефтепродуктов $< 0.5$ мас. %	0.6–0.7	0.00–0.05	17.0–21.0	60.0–70.0	1.2–1.3	0.15–0.25	3.0–10.0	
5	Глина твердая (до полутвердой) с содержанием нефтепродуктов 0.5–1.0 мас. %	0.5–0.6	0.00–0.05	15.0–18.0	40.0–45.0	1.2–1.5	0.15–0.25	7.0–15.0	
6	Глина твердая (до полутвердой) с содержанием нефтепродуктов 1.0–3.0 мас. %	0.4–0.5	0.001–0.05	12.0–15.0	30.0–40.0	1.0–1.5	0.25–0.50	10.0–17.0	
7	Глина пластичная с содержанием нефтепродуктов 3.0–5.0 мас. %	0.4–0.5	0.001–0.05	9.0–12.0	25.0–35.0	$< 1$	0.50–0.75	17.0–25.0	
8	Суглинок с доломитом с содержанием нефтепродуктов 1.0–3.0 мас. %	0.45–0.8	0.01–0.1	20.0–30.0	25.–35.0	1.2–1.3	0.25–0.50	5.0–12.0	
9	Суглинок с доломитом с содержанием нефтепродуктов 3.0–5.0 мас. %	0.65–0.75	0.01–0.1	15.0–25.0	15.0–20.0	1.2–1.3	0.50–1.0	3.0–10.0	
10	Смесь песков и нефтешламов с содержанием нефтепродуктов более 5.0 мас. %	0.65–0.75	0.4–0.6	15.0–20.0	10.0–15.0	1.5–1.55	–	1.0–5.0	
11	Нефтешламы с содержанием нефтепродуктов более 10 мас. %	$> 0.8$	$< 0.001$	–	–	1.25–1.30	–	–	
12	Буровые шламы на водной основе сульфидные/пылеватые (содержание нефтепродуктов менее 0.05 мас. %)	$> 0.8$	$< 0.001$	–	–	1.90–2.10	–	–	

Таблица 3. Геоэкологические показатели загрязненных грунтов и шламов (по данным инженерных изысканий)

№ п/п	Наименование породы (ИГЭ)	Показатели						Коэффициент степени опасности отхода, $K_0$
		Общее содержание нефтепродуктов, $C_{н.п.гр.}$ (мг/кг)		Коэффициент фильтрации грунта, $K_f$ , м/сут	Коэффициент динамической вязкости $M$ , при $5.0 \pm 2.0^\circ C$ ( $Па \cdot c \cdot 10^{-3}$ )	Глубина залегания подземных вод от поверхности земли, $H_{п.в.}$ (м)	Коэффициент	
в грунте	в подземных водах							
1	Песок мелкий/пылеватый с содержанием нефтепродуктов <0.5 мас. %	1462–3643	0.15–0.57	0.1–2.0	98–344	8.0 ± 0.5	87–119	
2	Песок мелкий с содержанием нефтепродуктов 0.5–1.0 мас. %	5211–9427	0.78–2.43	0.1–2.0	485–1024	8.0 ± 0.5	136–422	
3	Песок мелкий с содержанием нефтепродуктов ≥1.0 мас. %	12293–24690	3.55–10.15	0.1–2.0	877–2480	8.0 ± 0.5	495–813	
4	Глина твердая с содержанием нефтепродуктов <0.5 мас. %	1287–3425	0.22–0.75	<5.0·10 <sup>-4</sup>	2732–9584	12.0 ± 0.5	62–217	
5	Глина твердая (до полутвердой) с содержанием нефтепродуктов 0.5–1.0 мас. %	6189–10332	4.45–15.76	<5.0·10 <sup>-5</sup>	12452–18584	12.0 ± 0.5	582–970	
6	Глина твердая (до полутвердой) с содержанием нефтепродуктов 1.0–0 мас. %	14226–29470	3.88–26.52	3.2·10 <sup>-4</sup> –7.4·10 <sup>-5</sup>	27633–38488	12.0 ± 0.5		
7	Глина пластичная с содержанием нефтепродуктов 3.0–5.0 мас. %	38204–68328	31.45–57.73	8.1·10 <sup>-5</sup> –5.2·10 <sup>-6</sup>	39629–54831	18.0 ± 0.5	2643–7910	
8	Суглинок с доломитом с содержанием нефтепродуктов 1.0–3.0 мас. %	9248–29242	1.07–3.62	4.6·10 <sup>-5</sup> –2.1·10 <sup>-6</sup>	47228–79315	27.0 ± 0.5	3558–8034	
9	Суглинок с доломитом с содержанием нефтепродуктов 3.0–5.0 мас. %	34250–52243	18.39–24.55	1.3·10 <sup>-6</sup> –3.4·10 <sup>-7</sup>	82941–112062	27.0 ± 0.5	9268–21452	
10	Смесь песков и нефтешламов с содержанием нефтепродуктов ≥5.0 мас. %	69251–112452	112.94–285.94	<5.0·10 <sup>-4</sup>	11836–25387	4.0 ± 0.5	18593–42176	
11	Нефтешламы с содержанием нефтепродуктов ≥10 мас. %	155727–468950	2190.4–4238.2	<5.0·10 <sup>-5</sup>	162943–272540	1.5 ± 0.2	53296–86452	
12	Бурые шламы на водной основе суглинистые/пылеватые (содержание нефтепродуктов <0.05 мас. %)	128–501	0.04–0.17	0.1–2.0	287–789	1.0 ± 0.1	23–55	

Для определения соответствия вида возводимого сооружения типу грунта по загрязненности все установки по расчетным и фактическим нагрузкам на основе дифференцированы на три группы:

– *группа 1* – в основном в неё входят временные или бесфундаментные сооружения и часть эстакад. Нагрузки на основе составляют до 1.0 МПа;

– *группа 2* – к ней отнесли основной набор сооружений с фундаментами ленточного и, частично, свайного типов глубиной 3.0–5.0 м под нагрузками от 1.0 до 3.0 МПа;

– *группа 3* – сооружения на свайных фундаментах, резервуарные парки от 10 до 50 тыс. м<sup>3</sup> и более, а также новые ТЭЦ. Сооружения имеют заглубленную часть ниже –5.00 м. Нагрузки составляют более 3.0 МПа (в отдельных случаях 10.0 МПа и более).

Сооружения группы 1 с нагрузками на естественное или создаваемое основания до 1.0 МПа расположены в I аэробной подобласти. Их строительство не требует извлечения загрязненных грунтов. Очистку грунтов можно ограничить внесением биодобавок, слоевой биотермической деградацией углеводородов, начиная с концентраций более 2000 мг/кг масс с аэрацией рыхлением и последующей укаткой.

Во II аэробной подобласти – от (–3.00) до (–5.00) целесообразно извлечение загрязненного грунта экскавацией с вывозом на полигон. Методы очистки подобных грунтов сопряжены с необходимостью штабельно–слоевой биодеструкции в диапазоне исходных концентраций углеводородов от 2000 до 50000 мг/кг. масс. Аэрацию штабелей возможно проводить от средненапорных воздуходувных устройств с давлением нагнетания 1.0–3.0 кПа. Также возможна подача раствора флокулянта через дрены под давлением до 1.0–2.0 МПа.

Сооружения группы 2 с нагрузками на основе до 3.0 МПа располагаются в аэробной и частично в аноксидной области. Извлечение грунта экскавационной техникой здесь возможно до глубин 10.0 м. В качестве технологий очистки такого грунта авторами рекомендована биохимическая деструкция в штабелях. Возможна биодеструкция углеводородов без извлечения нефтегрунта непосредственно в грунтовом массиве с использованием газодренажной системы и средненапорных аэрационных устройств (воздуходувки; компрессоры; давление более 3.0 кПа).

В отдельных случаях, на стесненных территориях с опасными производствами, извлечение грунта затруднено или невозможно. В подобных условиях в аноксидной области предпочтительна средненапорная (P – 3.0–10.0 МПа) очистка от загрязнений с отводом стока на ЛОС.

В анаэробной области (группа 3) нагрузки со стороны сооружений составляют 3.0–10.0 МПа и более. Криофильные условия среды, отсутствие доступа кислорода на глубину более 10.0 м не позволяют осуществлять очистку биохимическими методами. Поэтому для ликвидации углеводородных загрязнений здесь предпочтительны высоконапорная очистка (P > 10.0 МПа) с отводом стока на ЛОС, а в отдельных случаях методы цементации загрязненных пород.

## ВЫВОДЫ

1. Загрязненные грунты, как потенциальные основания для строительства, в диапазоне глубин, дифференцированы на области: I и II аэробные (1.0–3.0 м), аноксидную (3.0–10.0 м) и анаэробную (более 10 м).

2. Определены диапазоны значений геомеханических и геоэкологических показателей загрязненных пород, а также их смесей с нефтешламами, как потенциальных строительных оснований и, в частности: коэффициентов фильтрации ( $10^{-1}$ – $10^{-7}$  м/сут), динамической вязкости (0.1–300.0 Па·с), степени опасности (100–100 тыс.), модуля деформации (10.0–50.0 МПа), сцепления (10.0–70.0 кПа), показателей текучести и пластичности для диапазона значений концентраций нефтепродуктов 0.5 – 10.0 мас. % грунта.

3. Созданы новые и адаптированы существующие технологии удаления нефтяных загрязнений из грунтов без нарушения их механической сплошности и, в частности, высоконапорная технология подачи реагентного раствора в диапазоне давлений нагнетания от 1.0 до 10.0 МПа и более. Данная технология позволяет снижать содержания загрязнений углеводородной природы с 10% масс (100 тыс. мг/кг грунта) до остаточных значений менее 0.2 мас. % (2 тыс. мг/кг грунта) и достигать соответствия региональному нормативу Самарской области по нефтепродуктам в грунтах, как потенциальных оснований для ведения строительных работ.

4. Технологии очистки грунта от загрязнений для последующего осуществления хозяйственной деятельности входят составной частью в специализированные предприятия – комплексы восстановления нарушенной геосреды.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Аковецкий В.Г., Афанасьев А.В., Михедова Е.Е.* Геологические проблемы нефтегазового комплекса и пути их // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2020. 2(293). С. 7–14.
2. *Большаков М.Н., Скибицкая Н.А., Кузьмин В.А., Марутян О.О.* Определение остаточной нефтегазонасыщенности способом прямой капиллярной пропитки // Нефтяное хозяйство. 2014. № 4. С. 30–32.

3. *Боревский Б.В., Боревский Л.В., Бухарин С.М. и др.* К проблеме локализации ликвидации нефтяных загрязнений на объектах Минобороны РФ // *Геоэкология*. 1997. №5. С. 75–83.
4. *Борисов И.В.* Использование микробиологических технологий для ликвидации глубоких нефтяных загрязнений [Электронный ресурс]. URL: <https://www.gubkin.ru>
5. *Быков Д.Е., Чертес К.Л., Петренко Е.Н. и др.* Санация недр территории нефтеперерабатывающих заводов // *Экология и промышленность России*. 2019. Т. 23. № 2. С. 9–13.
6. *Галинуров И.Р., Сафаров А.М., Кудашева Ф.Х. и др.* Миграция нефтяных углеводородов в профиле прирусловых пойменных почв // *Вестник Башкирского университета*. 2011. Т. 16. №1. С. 47–52.
7. *Зеленцов Д.В., Тупицына О.В., Чертес К.Л.* Конструктивно-строительное оформление системы и сооружений подачи и распределения воздуха в обращении с отходами // *Вестник МГСУ*. 2019. Т. 14. № 1 (124). С. 118–125.
8. *Мангушев Р.А., Карлов В.Д., Сахаров И.И.* Механика грунтов: учебник. М.: Издательство АСВ, 2015. 256 с.
9. *Назаров М.В.* Обезвреживание грунтов, пропитанных углеводородами // *Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе*. 2019. № 3 (288). С. 20–24.
10. *Новиков А.Н.* Загрязнение почвы нефтью и нефтепродуктами. М.: Огни, 2019. 603 с.
11. Патент на изобретение RU 2450873 С2, 20.05.2012. Способ переработки нефтешламов и очистки замазанных грунтов. Авторы: Чертес К.Л., Быков Д.Е., Тупицына О.В., Радомский В.М., Уварова Н.А. и др.
12. Патент на изобретение RU 2752983 С1 Россия, В09С 1/02, Е21В 43/16. Способ очистки нефтезагрязненного грунта с применением высоконапорной технологии. Авторы: Тупицына О.В. Чертес К.Л., Пыстин В.Н. и др. Дата регистрации: 27.10.2020. Дата публикации: 11.08.2021.
13. *Чертес К.Л., Букин А.А., Бухман Н.С. и др.* Прогнозирование и ликвидация загрязнений, сформированных объектами накопленного экологического вреда (на примере бездействующих шламонакопителей) // *Экология и промышленность России*. 2023. Т. 27. № 9. С. 33–39.
14. *Чертес К.Л., Тупицына О.В., Пыстин В.Н., Мартыненко Е.Г. и др.* Штабельно-слоевая биодеструкция нефтепродуктов в шламовых отходах // *Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе*. 2018. № 3. С. 43–48.
15. *Чертес К.Л., Тупицына О.В., Пыстин В.Н., Шишкин В.Я. и др.* Геоинженерная защита территорий, нарушенных объектами накопленного экологического вреда // *Экология и промышленность России*. 2020. Т. 24. № 4. С. 10–15.

## GEOECOLOGICAL AND ENGINEERING GEOLOGICAL SPECIFICS OF WASHING GEOENVIRONMENT FROM HYDROCARBON POLLUTION

K. L. Chertes<sup>1,#</sup>, A. A. Lavrusevich<sup>2,3</sup>, V. N. Pystin<sup>1</sup>, O. V. Tupitsina<sup>1</sup>, A. D. Pashkov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Samara State Technological University, ul. Molodogvardeiskaya 244, Samara, 443100 Russia*

<sup>2</sup>*All-Russian Research Institute for Civil Defense and Emergencies of the Russian Emergencies Ministry, ul. Davydkovskaya 7, Moscow, 121352 Russia*

<sup>3</sup>*Sergo Ordzhonikidze Russian State Geological Exploration University, Miklouho-Maclay st. 23, Moscow, 117997 Russia*

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

It is proposed to classify areas of contaminated geoenvironment in the territories of oil complex enterprises and the methods used for removing hydrocarbons depending on the depth. A set of technologies has been developed and introduced into construction practice that make it possible to remove hydrocarbon-containing pollution without soil extraction in the territories of reconstructed and closed oil complex facilities. Elements of the technological scheme for washing soils for various conditions of occurrence of hydrocarbon contaminants are presented.

**Keywords:** *polluted geoenvironment, oil complex, soil washing, geomechanical indicators, biothermal treatment*

### REFERENCES

1. Akovetskii, V.G., Afanas'ev, A.V., Mikhedova, E.E. [Geological problems of the oil and gas complex and the ways to solve them]. *Zashchita okruzhayushchei sredy v neftegazovom komplekse*, 2020, no. 2 (293), pp. 7-14. (in Russian)
2. Bol'shakov, M.N., Skibitskaya, N.A., Kuz'min, V.A., Marutyan, O.O. [Determination of residual oil and gas saturation by the direct-flow capillary impregnation]. *Neftyanoe khozyaistvo*, 2014, no. 4, pp. 30-32. (in Russian)
3. Borevskii, B.V., Borevskii, L.V., Bukharin, S.M., et al. [To the problem of localizing oil pollution elimination at the facilities of the Ministry of Defense of the Russian Federation]. *Geoekologiya*, 1997, no.5, pp. 75-83. (in Russian)
4. Borisov, I.V. [The use of microbiological technologies for the elimination of deep oil pollution]. Electronic resource. URL: <https://www.gubkin.ru> (in Russian)
5. Bykov, D.E., Chertes, K.L., Petrenko, E.N., et al. [Subsoil rehabilitation in the territory of oil refineries]. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*, 2019, vol. 23, no. 2, pp. 9-13. (in Russian)
6. Galinurov, I.R., Safarov, A.M., Kudasheva, F.Kh., et al. [Migration of petroleum hydrocarbons in the profile of coastal floodplain soils]. *Vestnik Bashkirskogo universiteta*, 2011, vol. 16, no. 1, pp. 47-52. (in Russian)

7. Zelentsov, D.V., Tupitsyna, O.V., Chertes K.L. [Constructive design of air supply and distribution systems and engineering structures in waste management]. *Vestnik MGSU*, 2019, vol. 14, no. 1 (124), pp. 118-125. (in Russian)
8. Mangushev, R.A., Karlov, V.D., Sakharov, I.I. [Soil and rock mechanics]. Moscow, ACB Publ., 2015, 256 p. (in Russian)
9. Nazarov, M.V. [Neutralization of soils saturated with hydrocarbons]. *Zashchita okruzhayushchei sredy v neftegazovom komplekse*, 2019, no. 3 (288), pp. 20-24. (in Russian)
10. Novikov, A.N. [Soil pollution by oil and petroleum products]. Moscow, Ogni Publ., 2019, 603 p. (in Russian)
11. Patent RU 2450873 C2, [A method for processing oil sludge and cleaning contaminated soils]. Authors: Chertes, K.L., Bykov, D.E., Tupitsyna, O.V., Radomskii, V.M., Uvarova, N.A. et al. 2012. (in Russian)
12. Patent RU 2752983 C1, B09C 1/02, E21B 43/16. [A method for cleaning oil-contaminated soil using high-pressure technology]. 2021. (in Russian)
13. Chertes, K.L., Bukin, A.A., Bukhman, N.S., et al. [Forecasting and elimination of pollution generated by objects of accumulated environmental damage (using the example of inactive sludge accumulators)]. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*, 2023, vol. 27, no. 9, pp. 33-39. (in Russian)
14. Chertes, K.L., Tupitsyna, O.V., Pystin, V.N., Martynenko, E.G. et al. [Stack-layer biodegradation of petroleum products in sludge waste]. *Zashchita okruzhayushchei sredy v neftegazovom komplekse*, 2018, no. 3, pp. 43-48. [https://doi.org / 10.18412/1816-0395-2017-10-38-43](https://doi.org/10.18412/1816-0395-2017-10-38-43) (in Russian)
15. Chertes, K.L., Tupitsyna, O.V., Pystin, V.N., Shishkin, V.Ya., et al. [Geoengineering protection of territories violated by objects of accumulated environmental damage]. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*, 2020, vol. 24, no. 4, pp. 10-15. [https://doi.org /10.18412/1816-0395-2020-4-10-15](https://doi.org/10.18412/1816-0395-2020-4-10-15) (in Russian)