

ISSN 0869-7809

Номер 3

Май - Июнь 2023



ГЕОЭКОЛОГИЯ

*Инженерная геология
Гидрогеология
Геокриология*

www.sciencejournals.ru



СОДЕРЖАНИЕ

Номер 3, 2023

КОЛОНКА ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА 3

Неоструктурное районирование Российской части Казбекского сегмента мегасвода большого Кавказа

С. А. Несмеянов, М. Ю. Никитин, О. А. Воейкова, М. Н. Комаревская 5

ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ ПРИРОДНЫХ И ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Временные и пространственные закономерности проявлений криогенных процессов при эксплуатации железных дорог в южной части Большеземельской тундры в условиях изменяющегося климата

А. А. Горбунова, Г. З. Зарипова, В. С. Исаев, В. Н. Манский, Р. В. Собин, Д. О. Сергеев, А. П. Безделова 15

ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

Нетрадиционные типы карста Южного Урала и Предуралья

А. И. Смирнов 26

Анализ механизма образования провалов в многолетнемерзлых породах на участке развития межмерзлотных подземных вод с позиций формирования диссипативных геологических структур

Г. П. Постоев, Л. А. Гагарин, А. И. Казеев, М. М. Кучуков, Н. А. Павлова 37

Изменения геодинамической обстановки, проявившиеся в вариациях почвенного радона, температуры и аномальных природных явлениях в зоне Катав-Ивановского землетрясения 05.09.2018 года на Южном Урале

А. К. Юрков, И. А. Козлова, С. В. Бирюлин, Б. Д. Хацкевич 47

Оценка изменения природных рисков в пределах эрозионно-термокарстовых равнин под действием климатических трендов

А. С. Викторов, В. Н. Капралова, М. В. Архипова, Т. В. Орлов 56

ЗАГРЯЗНЕНИЕ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

Мониторинг загрязнения донных отложений тяжелыми металлами для различных водных объектов Верхней Волги

Г. Ю. Толкачев, Б. И. Корженевский, Н. В. Коломийцев 65

УТИЛИЗАЦИЯ И ЗАХОРОНЕНИЕ ОТХОДОВ

Особенности строения, функционирования и реконструкции полигона захоронения отходов ПАО «НИЖНЕКАМСКНЕФТЕХИМ»

Р. Х. Мусин, А. Р. Галиева, Н. А. Курлянов 76

МЕТОДОЛОГИЯ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Анализ методов картографирования растительного покрова Казанско-Вешенского песчаного массива

Д. И. Арчаков, Т. Я. Турчин 88

ХРОНИКА

Двадцать четвертые «Сергеевские чтения». Фундаментальные и прикладные вопросы инженерной геодинамики

О. Н. Еремина 98

Contents

Number 3, 2023

EDITOR-IN-CHIEF COLUMN 3

Neostructural zoning of the Russian part of the Kazbek segment of the Greater Caucasus megavault
S. A. Nesmeyanov, M. Yu. Nikitin, O. A. Voeikova, M. N. Komarevskaya 5

FUNCTIONING OF NATURAL AND NATURAL ANTHROPOGENIC SYSTEMS

Temporal and spatial patterns of permafrost phenomena along operated railroad in the southern part of Bolshezemel'skaya tundra under a changing climate
A. A. Gorbunova, G. Z. Zaripova, V. S. Isaev, V. N. Manskii, R. V. Sobin, D. O. Sergeev, and A. P. Bezdelova 15

NATURAL AND TECHNONATURAL PROCESSES

Non-traditional karst types in the Southern Urals and CisUrals
A. I. Smirnov 26

Analysis of the sinkhole formation mechanism in permafrost rocks in the site of intrapermafrost groundwater development with regards of dissipative geological structures
G. P. Postoev, A. L. Gagarin, A. I. Kazeev, M. M. Kuchukov, and N. A. Pavlov 37

Changes in geodynamic situation manifested in soil radon and temperature variations and abnormal natural phenomena in the zone of Katav-Ivanovsk earthquake (05.09.2018), the Southern Urals
A. K. Yurkov, I. A. Kozlova, S. V. Biryulin, and B. D. Khatskevich 47

Evaluation of natural risk changes within erosional thermokarst plains under the impact of climatic trends
A. S. Viktorov, V. N. Kapralova, M. V. Arkhipova, and T. V. Orlov 56

ENVIRONMENT CONTAMINATION

Monitoring of bottom sediment pollution with heavy metals for various water bodies in the upper Volga region
G. Yu. Tolkachev, B. I. Korzhenevskiy, and N. V. Kolomiytsev 65

UTILIZATION AND DISPOSAL OF WASTE

Features of the structure, functioning and reconstruction of the landfill Nizhnekamskneftekhim Public Joint Stock Co.
R. Kh. Musin, A. R. Galieva, and N. A. Kurlyanov 76

RESEARCH METHODS AND TECHNIQUES

Analysis of methods for mapping the vegetation cover at the Kazan-Veshensky sand massif
D. I. Archakov and T. Ya. Turchin 88

CHRONICLE

Twenty-fourth conference in commemoration of academician E.M. Sergeev. Fundamental and applied issues of engineering geodynamics
O. N. Eremina 98

КОЛОНКА ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

Глубокоуважаемые читатели и авторы журнала!

DOI: 10.31857/S0869780923030062, EDN: WMZSCE

С выпуска журнала № 3 2023 г. новая редакция коллегия приступила к работе в том составе, который вы видите на нашей обложке. На своем первом заседании мы обсудили текущее состояние дел и согласились с тем, что главной своей задачей будем считать обеспечение высокого научно-методического уровня публикуемых статей, их разнообразия и авторитета журнала в научном сообществе.

В нашей области науки в России издается значительное число научных журналов, и хотим мы этого или нет, но вступаем с ними в конкуренцию за наиболее интересных и талантливых авторов и результаты их исследований. В настоящее время происходит экспоненциальное увеличение объема информации, которым не слишком успешно пытается оперировать наша техническая цивилизация, “научные” статьи уже могут быть созданы по заданному шаблону из любого набора даже абсурдных данных искусственным интеллектом и даже при полном отсутствии естественного. В этой ситуации журналу очень важно найти свою отчетливую, но емкую научную “нишу”, и не включиться ненароком в гонку по распространению информационного шума. Поэтому мы не ставим себе отдельной цели по достижению неких количественных показателей публикационной активности, но будем рады, если они возникнут как отражение интереса и востребованности опубликованных в журнале статей у наших читателей.

Мы обращаем внимание и авторов, и читателей журнала, что его полное наименование включает Инженерную геологию, Гидрогеологию и Геокриологию, которые редколлегией рассматривает как основные и важнейшие рубрики, и которые будут теперь специально обозначаться в выпусках журнала наряду с остальными. Таким образом, все вопросы, входящие в этот научный цикл, безусловно, соответствуют тематике нашего журнала, даже если они и не затрагивают явным образом экологическую проблематику. Ведь основная содержательная задача “геоэкологии” как междисциплинарного научного направления заключается в изучении изменений жизнеобеспечивающих ресурсов геосфер Земли под влиянием природных и антропогенных факторов и в обосновании их рационального использования. Решение этой задачи предполагает изучение обра-

зующихся в результате человеческой деятельности природно-технических систем и разработку механизмов управления ими, включая обоснование проектирования, безопасного размещения и эксплуатации инженерных сооружений. Обеспечение безопасности инженерных сооружений, в свою очередь, требует глубокого понимания природы и закономерностей развития геологических и инженерно-геологических процессов в массивах грунтов с учетом их состава, состояния и свойств, гидрогеологических и геокриологических особенностей.

Кроме этого, редколлегией планируется вести в журнале регулярную рубрику по обзору нормативных документов в области инженерных изысканий с размещением в ней и статей по научно-методическим основам новых и обновляемых нормативных документов. Это важная задача, поскольку нормативных документов появляется все больше, а их обновленные версии могут не только уступать по качеству предшествующим, но и вступать в противоречие с другими документами, так как во многом схожие по содержанию нормы могут, к сожалению, проходить экспертизу в разных технических комитетах. За всем этим обилием информации практически невозможно уследить отдельно взятому специалисту.

Наконец, редакция приняла решение о периодическом выпуске тематических номеров журнала по наиболее актуальным, интересным или дискуссионным вопросам исследований в нашей области науки, прежде всего – методическим. И я рад объявить о начале приема статей для двух тематических выпусков:

1. **Модели в инженерной геологии и гидрогеологии** – статьи, подготовленные в соответствии с Правилами для авторов журнала, принимаются до 30 сентября 2023 г.

2. **Дистанционные методы зондирования Земли при решении геоэкологических и инженерно-геологических задач** – статьи, подготовленные в соответствии с Правилами для авторов журнала, принимаются до 30 ноября 2023 г.

Статьи, успешно прошедшие рецензирование, но не включенные в тематические номера, будут опубликованы в обычном порядке в очередных выпусках журнала.

Редакционная коллегия относится с особым вниманием к материалам, поступающим на ежегодную научную конференцию “Сергеевские чтения” – одну из немногих конференций, на которую представляются результаты фундаментальных научных исследований в области, совпадающей с основными тематиками журнала. В связи с этим оргкомитет конференции обращается и будет обращаться к авторам наиболее содержательных докладов с предложением о представлении их в формате полновесных статей в наш журнал.

Редакционная коллегия также готова предоставить место для научных дискуссий, открыв в

журнале соответствующую рубрику. Желающие вынести дискуссионные вопросы на обсуждение в нашем журнале приглашаются присылать короткие заметки, объемом до 2 стандартных страниц вместе с рисунками и таблицами (если уместны), оформленные по правилам журнала. Право отбора материалов для публикации остается за редколлегией.

С надеждой на увлекательное научное взаимодействие,

Главный редактор
Е. А. Вознесенский

УДК 551.248.2 (224.91)

НЕОСТРУКТУРНОЕ РАЙОНИРОВАНИЕ РОССИЙСКОЙ ЧАСТИ КАЗБЕКСКОГО СЕГМЕНТА МЕГАСВОДА БОЛЬШОГО КАВКАЗА

© 2023 г. С. А. Несмеянов¹, М. Ю. Никитин², О. А. Воейкова^{1,*}, М. Н. Комаревская¹

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

²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Геологический факультет,
Воробьевы горы, 1, Москва, 119899 Россия

*E-mail: voa49@mail.ru

Поступила в редакцию 20.03.2023 г.

После доработки 28.03.2023 г.

Принята к публикации 17.04.2023 г.

Казбекский сегмент отличается от смежных Центрального и Восточного сегментов мегасвода Большого Кавказа относительной суженностью основных зон и их широтной ориентировкой. Основные элементы сегмента – зоны Центральных поднятий, Северного и Южного крыльев. Зона Северного крыла делится на Внешнюю и Внутреннюю подзоны. Внешняя подзона Северного крыла включает: Алагир-Владикавказскую краевую цепь структурных ступеней, Дзагарисскую гряду поднятий, Тарскую наложенную впадину, Редантскую цепь грабенов, Фетхузскую гряду поднятий, Балтинский грабен и Восточную группу поперечных структурных ступеней. Во Внутреннюю подзону входят Гряда поднятий Скалистого хребта и Садонская шовная зона. Зона Центральных поднятий включает: Балкарскую группу блоков, грабен Верхнеурухской шовной зоны и Цея-Казбекское поднятие, к востоку от которого располагается Хевсуретская краевая седловина. К расположенной в пределах России части Зоны Южного крыла мегасвода относятся Мамисонская система прогибов и Рокская гряда поднятий. Применение оротектонического метода позволило выделить в пределах перечисленных региональных структур локальные структуры, большинство из которых разделены сбросами. Выделено три региональных шовных зоны. На севере Казбекского сегмента протягивается широкая и сложно построенная зона Владикавказского глубинного разлома. На южной границе Северного крыла расположена Садонская шовно-депрессионная зона с крупными надвигами в северном крыле. Западная часть Зоны Центральных поднятий пересекается Верхнеурухской шовно-депрессионной зоной, которая ответвляется от Садонской зоны. Полученные оригинальные данные, отсутствующие в стандартных материалах по геологической съемке, полезны для строительного проектирования и геоэкологии.

Ключевые слова: мегасвод, сегмент, зона, подзона, шовная зона, горст, структурная ступень, грабен, впадина, сброс, взброс, надвиг, флексура

DOI: 10.31857/S0869780923030086, **EDN:** WNBUPG

ВВЕДЕНИЕ

Обособление самостоятельного Казбекского сегмента обусловлено неоднородностью выделявшегося ранее обширного Восточного сегмента. Автор этого первоначального сегментирования новейшего мегасвода Большого Кавказа Е.Е. Милановский отмечал эту неоднородность, выделяя Осетино-Ингушский участок, расположенный между долиной р. Ардон на западе и левобережьем р. Аргун на востоке ([3], с. 170) и обособляя его от расположенного к востоку от р. Аргун Северо-Дагестанского участка ([3], с. 178). Поэтому представляется целесообразным имено-

вать рассматриваемый сегмент Казбекским (Осетино-Ингушским).

Специфика строения данного сегмента обусловлена более глубоким залеганием палеозойского фундамента, чем в Центральном сегменте.

Второй особенностью Казбекского сегмента является его значительная суженность, по сравнению, как с Центральным, так и Восточным сегментами. Е.Е. Милановский ([3], с. 159) полагал, что северный участок данного сегмента “сохранил в новейшей стадии тенденции к опусканию и вошел в состав юго-западной части Терского краевого прогиба (к югу от Сунженского поднятия)”. Эта территория включает соответственно Осетин-

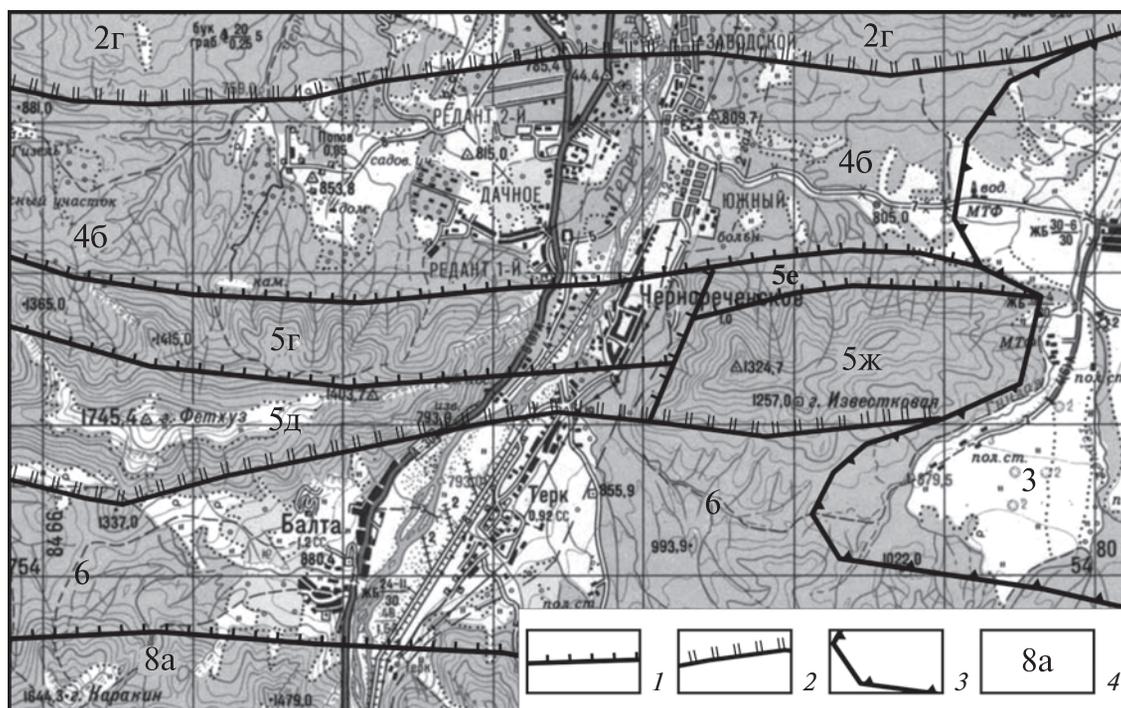


Рис. 1. Район преобладания позднеорогенных блоковых и складчато-блоковых структур, считавшихся ранее складчатыми. 1 – сбросы, 2 – сбросо-взбросы, 3 – пликативные границы наложенной впадины, 4 – номера блоковых и складчатых структур. Цифрами обозначены: 2г – Кажибосская горст-ступень, 3 – Тарская наложенная впадина, 46 – Редантский грабен, 5г – Южноредантская ступень, 5д – Фетхузский горст, 5е – Североизвестковая ступень, 5ж – Известковый горст, 6 – Балтинский грабен, 8а – Кионхох-Цорейламский горст).

скую и Чеченскую впадины, разделенные Датых-Назрановской седловиной. Она располагается ныне за пределами мегасвода Большого Кавказа.

Третьей специфической чертой российской части Казбекского сегмента служит преобладание на большей его части широтных новейших структур. Именно смена их простирающихся с широтного на юго-восточное служит одним из критериев проведения границы между Казбекским и Восточным сегментами мегасвода.

Важно отметить также, что, опираясь на материалы геологических съемок, Е.Е. Милановский характеризует большинство локальных структур в Северном крыле данного сегмента как складчатые или складчато-блоковые структуры. Например, им описываются: Фетхусская антиклиналь, Балтинская приразломная синклиналь, Лысогорско-Тарская антиклиналь, Редантская приразломная синклиналь и Верхнетерская, Кельская, Тарская впадины и т.п.

Однако картирование с применением ортектонического метода [4, 5] позднеорогенных структур показало, что многие локальные дислокации, будучи ограничены разрывами, должны считаться блоковыми или складчато-блоковыми структурами (структурными ступенями, горстами

и т.п.) [2] (рис. 1). Этот подход используется и в настоящем исследовании.

1. ОСНОВНЫЕ НЕОСТРУКТУРНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ КАЗБЕКСКОГО СЕГМЕНТА МЕГАСВОДА

Предложенная Е.Е. Милановским схема основных неоструктурных элементов рассматриваемого сегмента включала Северное крыло, которое делится на Внешнюю и Внутреннюю подзоны и граничит на юге со Срединной зоной поднятия Центрального Кавказа и поднятием Бокового хребта [3]. Эта схема, по существу, сохранила свое значение до настоящего времени, но переходящие друг в друга Срединное поднятие и поднятие Бокового хребта целесообразно объединить в зону Центральных поднятий, к югу от которой располагается зона Южного крыла (рис. 2).

Северным ограничением данного сегмента и мегасвода здесь считается *Владикавказский глубинный разлом*, имеющий довольно широкую и сложно построенную разломную зону. Как пишет Е.Е. Милановский ([3], с. 175), "*Владикавказский разлом ранее констатировался лишь в бассейне Камбилеевки, а западнее на всем протяжении границы Большого Кавказа и Осетинской впадины бы-*

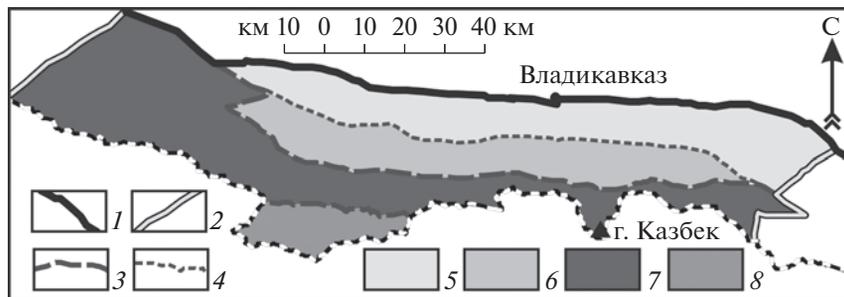


Рис. 2. Схема неоструктурного районирования российской части Казбекского сегмента мегасвода Большого Кавказа. 1–4 – границы: 1 – мегасвода Большого Кавказа, 2 – сегментов мегасвода, 3 – зон, 4 – подзон; 5–8 – структурные элементы мегасвода: 5–6 – подзоны зоны Северного крыла: 5 – Внешняя, 6 – Внутренняя; 7 – зона Центральных поднятий; 8 – зона Южного крыла.

ла прослежена крупнейшая флексура с относительно опущенным северным крылом, особенно крутая (до вертикальной) в породах палеогена и миоцена и более пологая – в более молодых слоях. Вертикальная амплитуда ее достигает 3 км. Очевидно, эта региональная флексура обусловлена длительными глыбовыми подвижками в фундаменте. Но если в третичное время северное крыло этого глубинного нарушения опускалось, то с конца плиоцена это крыло стало “задираться”, а южное оказалось относительно опущенным; подобный план движений наиболее резко выражен в залегании свиты руждзуар (N_2^3). В зоне Владикавказского разлома она образует асимметричную надразломную Лысогорско-Тарскую антиклиаль с пологим северным (10° – 15°) и крутым южным крылом (30° – 40°), переходящим к югу в Редантскую приразломную синклиаль”. Учитывается и зона Осетинских надвигов, которые “прилегают к зоне краевого глубинного Владикавказского разлома и, вероятно, являются его поверхностным отражением” ([3], с. 173).

Таким образом, зона Владикавказского разлома охватывает Владикавказскую краевую флексуру южного борта Осетинской впадины с амплитудой 2–4 км [8] и довольно широкую полосу поднятых новейших структур, разграниченных надвигами, которые в “западной части Северной Осетии, в бассейнах Фиагдона и Ардона являются “мертвыми” структурами, по-видимому, уже с позднего плиоцена. Однако восточнее в бассейнах Гизельдона, Терека и Камбилеевки, где разломы становятся круче и приобретают характер взбросов, продолжительность их “жизни” увеличивается, и мы ощущаем отчетливые признаки их развития в течение всего антропогена” ([3], с. 174). По геофизическим данным на границе Большого Кавказа и Осетинской впадины амплитуда смещения кровли фундамента достигает 5–6 км [9].

По результатам детальных геолого-геофизических исследований широкая зона Владикавказского разлома представлена тремя основными

разнотипными разрывными ветвями: северной, средней и южной [1, 6, 7]. У северной ветви поднятым служит южное крыло, а у средней и южной – северные крылья. Кроме того, северная и южная ветви сегментированы за счет смещений поперечными локальными разрывами. Соответственно, в понимаемой таким образом зоне Владикавказского разлома могут выделяться разномасштабные приповерхностные блоковые структуры новейшего мегасвода, северной границей которого на земной поверхности можно считать северную ветвь Владикавказского разлома.

Западной границей рассматриваемого сегмента служит Безенгийский¹ правый сдвиг [2]. Восточная граница определяется, как уже было сказано выше, сменой простираний основных структур с широтного, свойственного Казбекскому сегменту, на юго-восточное, характерное для Восточного сегмента.

Все выделенные Е.Е. Милановским региональные структуры включают большое количество локальных, преимущественно блоковых структур (табл. 1), ограниченных разрывами (табл. 2).

2. ВНЕШНЯЯ ПОДЗОНА СЕВЕРНОГО КРЫЛА МЕГАСВОДА

Внешняя подзона представлена наиболее узкими структурами преимущественно широтной ориентировки (рис. 3).

Подзона включает (с севера на юг): 1) Алагир-Владикавказскую краевую цепь структурных ступеней, 2) Дзагарисскую гряду поднятий, 3) Тарскую наложенную впадину, 4) Редантскую цепь грабенов, 5) Фетхузскую гряду поднятий, 6) Балтинский грабен, 7) Восточную группу поперечных структурных ступеней. Из них две первые

¹ Е.Е. Милановский ([3], с. 143) выделял “Безенгийский поперечный разлом, к которому приурочена прямолинейная долина верхнего течения р. Череха Безингийского”.

Таблица 1. Блоковые структуры

Номер	Название	Тип	Номер	Название	Тип
Казбекский сегмент			9 Садонская шовно-депресссионная зона		
1–9	Зона Северного крыла		9а	Айгамугский	грабен
1–7	Внешняя подзона		9б	Лахуранхохская	перемычка
1	Алагир-Владикавказская краевая цепь структурных ступеней		9в	Среднеардонский	грабен
1а	Алагирская	ступень	9г	Архонская	перемычка
1б	Верхнесанибайская	ступень	9д	Верхнефиагдонский	грабен
1в	Южновладикавказская	ступень	9е	Южнохианхохская	перемычка
1г	Южномужичинская	ступень	9ж	Терек-Ассинский	грабен
1д	Североболойламская	ступень	10	Зона Центральных поднятий	
1е	Клакбайская	ступень	10	Балкарская группа блоков	
1ж	Келахбасская	ступень	10а	Эмеллийская	ступень
2	Дзагарисская гряда поднятий		10б	Верхнебалкарская	высокая ступень
2а	Сурхское	поднятие	10в	Дыхтауский	горст
2б	Дзагарисский	горст	10г	Галдорская	горст-ступень
2в	Гагаборская	горст-ступень	10д	Кушеская	горст-ступень
2г	Кажчибосская	горст-ступень	10е	Верхнегалаузская	ступень
3	Тарская наложенная впадина		11	Грабен Верхнеурухской шовно-депресссионной зоны	
4	Редантская цепь грабенов		12	Цея-Казбекское поднятие	
4а	Тагардонский	грабен	12а	Лабдинская	горст-ступень
4б	Редантский	грабен	12б	Цейская	ступень
4в	Верхнеалкунский	грабен	12в	Цеяхохская	высокая ступень
5	Фетхузская гряда поднятий		12г	Скаронская	ступень
5а	Тагаррагская	ступень	12д	Цейско-Казбекский	горст
5б	Хошхаранрагская	высокая ступень	12е	Бастыламская	ступень
5в	Хосавдрагский	горст	13–15	Зона Южного крыла	
5г	Южноредантская	ступень	13	Мамисонская система прогибов	
5д	Фетхузский	горст	13а	Мамихдонская	грабен-ступень
5е	Североизвестковая	ступень	13б	Нижнемамихдонский	грабен
5ж	Известковый	горст	13в	Зарамагская	горст-ступень
5з	Мордламская	ступень	14	Рокская гряда поднятий	
5и	Борзонтйская	горст-ступень	14а	Шода-Халацинский	горст
5к	Восточноборзонтйская	циркообразная ступень	14б	Рокская	горст-ступень
6	Балтинский грабен		14в	Зилгахохский	горст
7	Восточная группа поперечных структурных ступеней		15	Хевсуретская седловина	
7а	Варгиламская	ступень			
7б	Юкерламская	ступень			
8–9	Внутренняя подзона				
8	Гряда поднятий Скалистого хребта				
8а	Кионхох-Цорейламский	горст			
8б	Коскинская	горст-ступень			
8в	Каракинская	ступень			

Таблица 2. Разрывные структуры

Номер	Название	Тип	Номер	Название	Тип	
Казбекский сегмент			Внутренняя подзона			
Зона Северного крыла			24	Каракинский	сброс	
Внешняя подзона			25	Северосадонский	надвиг	
1–4	Владикавказская флексурно-разрывная зона		25а	Дашсарский	надвиг	
1	Северная (Алагирская) ветвь		25б	Цорейламский	взброс	
	1а	Суадагский	взброс	26	Кушеский	сброс
	1б	Санибаский	взброс	27	Южносадонский	сброс
	1в	Гизельский	взброс	28/30а	Цеяхох-Бастыламский	сброс
	1г	Западномужичинский	взброс	Зона Централных поднятий		
	1д	Мужичинская	флексура	() 29	Безенгийский	сдвиг
2	Средняя ветвь		30	Иткайабашский	сброс	
	2а	Северодзагарисский	взброс	31	Туялинский	сброс
	2б	Северокориламский	сброс	32	Верхнехазнидонский	сброс
3	Южная (Североредантский взброс) ветвь		33	Хошхинхохский	сброс	
4	Поперечные сбросы		Верхнеурухская шовно-депресссионная зона			
	4а	Востономаймадагский	сброс	34	Южногалдорский	сброс
	4б	Восточносанидинский	сброс	35	Чирхский	сброс
	4в	Заводской	сбросо-сдвиг	36	Караугомский	сброс
	4г	Верхненетхойский	сброс	37	Цеядонский	сброс
	4д	Цраудонская	флексура	38	Николаевский	сброс
5	Тагардонский	сброс	39/31	Вегилам-Снеговой	сброс	
6	Ахшиногагский	сброс	40	Битехинский	сброс	
7	Северохосавдрагский	сброс	41/76а	Ацунта-Маистийский	сброс	
8	Среднегизельдонский	сбросо-сдвиг	42	Главный Кавказский	надвиг	
9	Южноредантский	сброс	Зона Южного крыла			
10	Северофетхузский	сброс	43	Зарамагский	сброс	
11	Чернореченский	сброс	44	Техтанский	сброс	
12	Североизвестковый	сброс	45	Северорокский	сброс	
13	Балтинский	взброс	46	Саухохский	сброс	
14	Хаихинский	сброс	47	Сбавский	сброс	
15	Мордламский	сброс				
16	Ушкортский	сброс				
17	Осухинский	сброс				
	17а	Борзонтский	циркообразный сброс			
18	Шалажаский	сброс				
19/13	Хочкочский	сброс				
20	Нашахаламский	сброс				
21	Яцебкортский	сброс				
22/27	Верхнебарский	сброс				
23	Южнобалтинский	сброс				

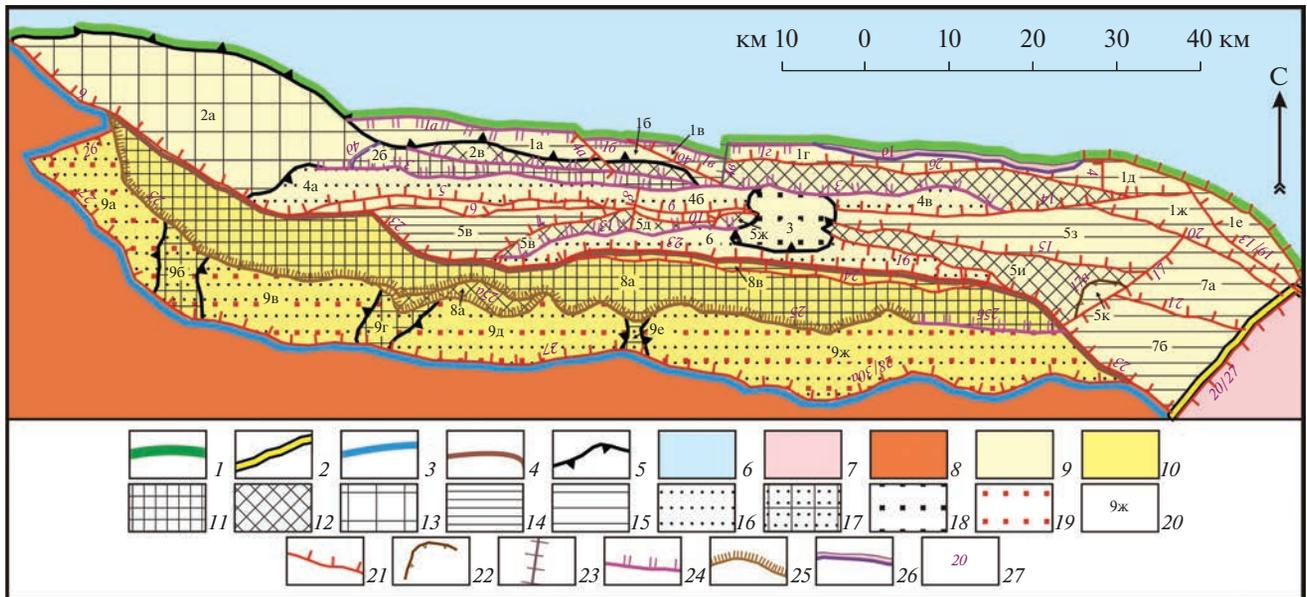


Рис. 3. Схема неоструктурного районирования зоны Северного крыла Казбекского сегмента мегасвода Большого Кавказа. 1–5 – границы: 1 – мегасвода Большого Кавказа, 2 – сегментов мегасвода, 3 – зон, 4 – подзон; 5 – пликативные границы локальных структур; 6 – Терско-Каспийский краевой прогиб; 7–10 – структурные элементы мегасвода: 7 – Восточный сегмент; 8–10 – структурные элементы Казбекского сегмента: 8 – зона Центральных поднятий, 9–10 – подзоны зоны Северного крыла: 9 – Внешняя, 10 – Внутренняя; 11–19 – типы блоковых и складчатых структур; 11 – горсты, 12 – горст-ступени, 13 – поднятия, 14 – высокие ступени, 15 – ступени, 16 – грабены, 17 – перемычки; 18 – наложенные впадины, 19 – шовно-депресссионные зоны; 20 – номера блоковых и складчатых структур (см. табл. 1); 21–25 – разрывные структуры: 21 – сбросы, 22 – циркообразные сбросы, 23 – сбросо-сдвиги, 24 – взбросы, 25 – надвиги; 26 – флексуры; 27 – номера разрывов и флексур (см. табл. 2).

располагаются между ветвями Владикавказского разлома. Перечисленные структуры, за исключением Тарской впадины, делятся на ряд локальных блоковых или складчато-блоковых структур.

Алагир-Владикавказская краевая цепь структурных ступеней (1) расположена между Северной (Алагирской – 1) и Средней (2) ветвями Владикавказского разлома. Ее западным элементом является Алагирская ступень (1а), отделенная от прямоугольной Верхнесанибайской ступени (1б), которая в свою очередь отграничивается на востоке Восточносандиным поперечным сбросом (4б) от треугольной Южновладикавказской ступени (1в). Последняя в свою очередь отделяется меридианальным Заводским сбросо-сдвигом (4в) от протяженных и разделенных Северодзагарисским взбросом (2а) от Южнужичинской ступени (1г) и Кажчибосской горст-ступени (2г), которая принадлежит восточной части Дзагарисской гряды поднятий (2).

Восточную часть Алагир-Владикавказской цепи ступеней образуют три небольших ступени: Северобойламскую (1д), Клакбайскую (1е) и Келахбасскую (1ж), ограниченных соответственно Хаихинским (14), Хочкочским (19/13) и Нашахаламским (20) сбросами.

Западная часть **Дзагарисской гряды поднятий** (2) неоднородна. На самом ее западе располагается обширное Сурхское поднятие (2а) с пликативным северным бортом. Восточнее находятся узкие Гагаборская горст-ступень (2в) и Дзагарисский горст (2б), разделенные Северодзагарисским взбросом (2а) из Средней ветви Владикавказского разлома. А вся Дзагарисская гряда (2) ограничена с юга Южной (Североредантский взброс) ветвью (3) этого разлома.

Южнее находится узкая **Редантская цепь грабенов** (4), в которой с запада на восток выделяются Тагардонский (4а), Редантский (4б) и Верхнеалкунский (4в) грабены. Два последних разделены изометричной Тарской наложенной впадиной (3), которая разделяет также и Фетхузскую гряду поднятий (5).

Тарская наложенная впадина (3) выполнена средне- и верхнеолейстоценовыми отложениями мощностью до 180 м, а р. Камбилеевка и ее притоки врезаются в плоскую поверхность поздней верхнеолейстоценовой террасы, слагающей поверхность впадины, всего на 10–15 м ([3], с. 177).

Фетхузская гряда поднятий (5) построена веерообразно. Два ее полувеера разделены Тарской наложенной впадиной. В каждом полувеере наи-

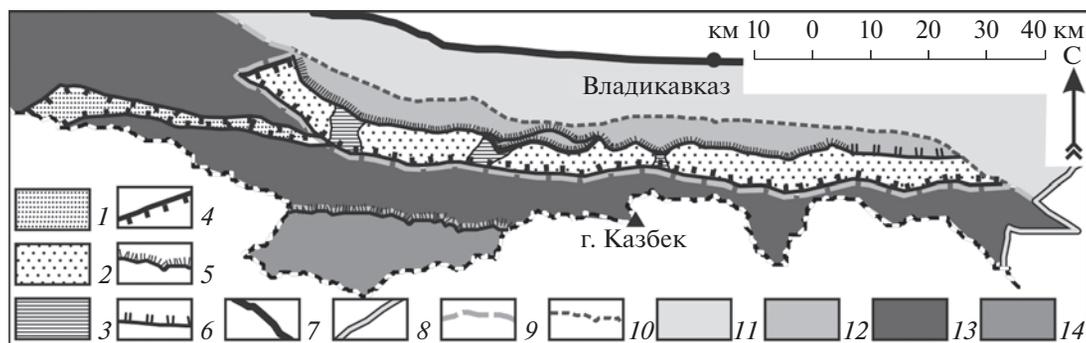


Рис. 4. Верхнеурухская и Садонская шовно-депресссионные зоны и смежные структуры. 1 – грабены Верхнеурухской шовно-депресссионной зоны; 2–3 – Садонская шовно-депресссионная зона: 2 – грабен-ячей, 3 – перемычки; 4–6 – разрывы: 4 – сбросы, 5 – надвиги, 6 – взбросы; 7–14 – элементы общего районирования: 7–10 – границы: 7 – мегасвода Большого Кавказа, 8 – сегментов мегасвода, 9 – зон, 10 – подзон западного сегмента; 11–14 – структурные элементы мегасвода: 11–12 – подзоны зоны Северного крыла: 11 – Внешняя, 12 – Внутренняя; 13 – Зона Центральных поднятий; 14 – Зона Южного крыла.

более приподнят южный блок (горст), к северу от которого находятся структурные ступени.

В западном полувеере юго-восточная гряда горстов включает разделенные поперечными Среднегизельдонским сбросо-сдвигом (8) и Чернореченским сбросом (11): Хосавдрагский (5в), Фетхузский (5д) и Известковый (5ж) горсты. К северу от первого из них после Северохосавдрагского сброса (7) расположена Хошхаранрагская высокая ступень (5б), а после Ашиногагского сброса (6) – Тагаррагская ступень (5а), ограниченная с севера Тагардонским сбросом (5). К северу от Фетхузского горста (5д), отделяясь Южноредантским сбросом (9), находится Южноредантская ступень (5г), а к северу от Известкового горста (5ж), отделяясь Североизвестковым сбросом (12), – Североизвестковая ступень (5е). Обе краевых ступени отделены от Редантского грабена (4б) Южноредантским сбросом (9).

В основании восточного полувеера расположена Борзонтитская горст-ступень (5и) с Восточноредантской циркуобразной ступенью (5к). А к северу от них, отделенная Мордламским сбросом (15), находится расширяющаяся к востоку Мордламская ступень (5з). Она граничит с Верхнеалкунским грабеном (4в) по Хаихинскому сбросу (14).

Западный полувеер Фетхузской гряды поднятий отделен от Балтинского грабена (6) Балтинским взбросом (13), а Борзонтитская горст-ступень (5и) – Ушкортским сбросом (16).

Балтинский грабен (6) является краевым перед Грядой поднятий Скалистого хребта (8), относящейся к Внутренней подзоне Зоны Северного крыла.

Восточная группа поперечных структурных ступеней (7) располагается у восточного края Казбекского сегмента мегасвода. Она представле-

на двумя прямоугольными ступенями: северной Варгиламской (7а) и южной Юкерламской (7б), разделенными Яцебкортским сбросом (21). С запада они ограничены Осухинским поперечным сбросом (17), с севера – Нашахаламским продольным сбросом (20), с юга – восточными окончаниями Южнобалтинского (23) и Южносадонского (27) региональных сбросов, а с востока – Верхнебарским краевым сбросом (22/27).

Вся Внешняя подзона Северного крыла мегасвода ограничена с юга Ашиногагским (6) и Южнобалтинским (23) сбросами.

3. ВНУТРЕННЯЯ ПОДЗОНА СЕВЕРНОГО КРЫЛА МЕГАСВОДА

Внутренняя подзона включает: Гряду поднятий Скалистого хребта (8) и Садонскую шовно-депресссионную зону (9).

Гряда поднятий Скалистого хребта (8) образована в основном протяженным Кионхох-Цорейламским горстом (8а), восточная часть которого обрамлена с севера узкой Каракинской ступенью (8в). С юга упомянутый горст ограничен Северосадонским надвигом (25), от центральной части которого ответвляется Дашсарский надвиг (25а). Между этими двумя надвигами зажата узкая и извилистая Коскинская горст-ступень (8б) или тектонический клин. У восточного окончания Кионхох-Цорейламского горста Северосадонский надвиг сменяется Цорейламским взбросом (25б).

К югу от надвигов, обрамляющих гряду поднятий Скалистого хребта, располагается столь же протяженная **Садонская шовно-депресссионная зона** (9). Она включает цепь грабен-ячей, разделенных пликативными перемычками (рис. 4).

С запада на восток в ней выделяются: Айгамугский грабен (9а), Лахуранхохская перемычка (9б),

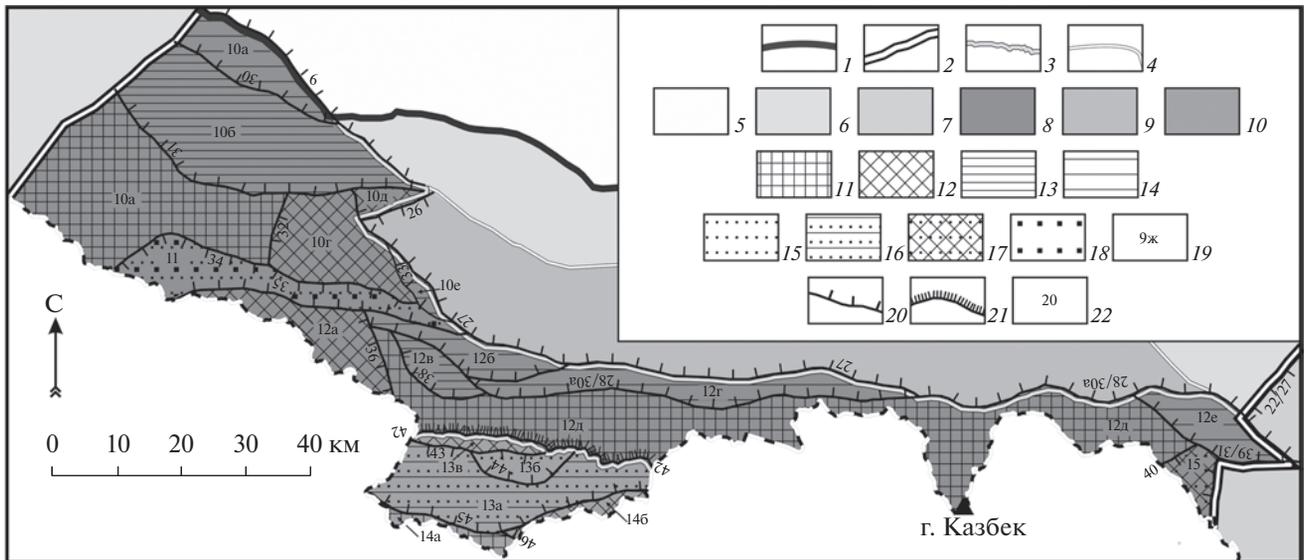


Рис. 5. Схема неоструктурного районирования Зоны Центральных поднятий и Зоны Южного крыла Казбекского сегмента мегасвода Большого Кавказа. 1–4 – границы: 1 – мегасвода Большого Кавказа, 2 – сегментов мегасвода, 3 – зон, 4 – подзон; 5 – Терско-Каспийский краевой прогиб; 6–10 – структурные элементы мегасвода: 6–7 – сегменты: 6 – Центральный, 7 – Восточный; 8–10 – структурные элементы Казбекского сегмента: 8 – зона Центральных поднятий, 9–10 – подзоны зоны Северного крыла: 9 – Внешняя, 10 – Внутренняя; 11–18 – типы блоковых структур зон Центральных поднятий и Южного крыла; 11 – горсты, 12 – горст-ступени, 13 – высокие ступени, 14 – ступени, 15 – грабены, 16 – грабен-ступени, 17 – седловины, 18 – шовно-депресссионные зоны; 19 – номера блоковых структур (см. табл. 1); 20 – сбросы, 21 – надвиги; 22 – номера разрывов (см. табл. 2).

Среднеардонский грабен (9в), Архонская перемычка (9г), Верхнефиагдонский грабен (9д), Южнохианхохская перемычка (9е) и Терек-Ассинский грабен (9ж).

Западный край шовно-депресссионной зоны ограничен Кушеским (26) торцовым сбросом, а восточный – восточным окончанием Южнобалтинского сброса (23).

Юг Садонской шовной зоны и всего Северного крыла мегасвода ограничен протяженным и местами извилистым Южносадонским сбросом (27).

4. ЗОНА ЦЕНТРАЛЬНЫХ ПОДНЯТИЙ

Зона Центральных поднятий, расширяясь, на западе замещает зону Северного крыла. Она попадает на территорию России частично и включает: Балкарскую группу блоков (10), грабен Верхнеурухской шовно-депресссионной зоны (11), Цей-Казбекское поднятие (12) (рис. 5).

Балкарская группа блоков (10) образует северную часть западного расширения Зоны Центральных поднятий. Здесь наиболее приподнята южная гряда, включающая с запада на восток Дыхтауский горст (10в), Галдорскую горст-ступень (10г) и расположенные восточнее Кушетскую горст-ступень (10д) и узкую Верхнегалаузскую ступень (10е), служащую обрамлением

Айгамугского грабена (9а) из Садонской шовной зоны.

К северу от упомянутых горста и двух горст-ступеней располагаются последовательно снижающиеся обширная Верхнебалкарская высокая ступень (10б) и узкая краевая Эмеллийская ступень (10а), северный борт которой служит границей мегасвода, обрываясь западным сегментом Ахшиногагского сброса (6).

К югу от южных горста и горст-ступеней Балкарской группы блоков проходит узкий широтный **Грабен Верхнеурухской шовно-депресссионной зоны (11)**, который, вероятно, является ответвлением от Садонской шовно-депресссионной зоны. Только у самой границы России окончание грабена, расширяясь, поворачивает к юго-западу. Северным ограничением этой шовной зоны служит Южногалдорский сброс (34), а южным – Чирхский сброс (35).

Цей-Казбекское поднятие (12) образует основной, довольно узкий ствол Осевого поднятия. Его западным элементом служит Лабадинская горст-ступень (12а), которая граничит по Караугомскому сбросу (36) с весьма протяженным и расширяющимся к востоку Цейско-Казбекским горстом (12д), где находится и вулкан Казбек.

К северо-западному краю этого горста примыкают две небольшие Цейхохская высокая (12в) и Цейская (12б) ступени и протяженная Скарон-

ская ступень (12г), которая обрамляет южный борт центральной части Садонской шовной зоны, отделяясь от нее по Южносадонскому сбросу (27). А от Цейско-Казбекского горста (12д) она отделена западной частью Цейхох-Бастыламского сброса (28/30а). Указанный горст граничит со структурами Южного склона по Главному Кавказскому надвигу (42). На востоке Цейско-Казбекский горст по Битехинскому сбросу (40) граничит с широкой на юге и суживающейся к северу *Хевсуретской седловиной* (15), которая разделяет осевые поднятия Казбекского и Восточного сегментов мегасвода.

5. ЗОНА ЮЖНОГО КРЫЛА

Попадающая в пределы рассматриваемой территории часть **Зоны Южного крыла** включает: Мамисонскую систему прогибов и Рокскую гряду поднятий (см. рис. 5).

Мамисонская система прогибов (13) представлена широкой и суживающейся к востоку Мамихдонской грабен-ступенью (13а), в средней части которой на севере находится небольшой, изогнутый Нижнемамихдонский грабен (13б). К северу от него, отделяясь также от грабен-ступени по Зарамагскому сбросу (43), располагается узкая Зарамагская горст-ступень (13в).

На юге Мамихдонская грабен-ступень по Северорокскому сбросу (45) граничит с **Рокской грядой поднятий (14)**. Последняя в пределах России включает Шода-Халацинский горст (14а), Рокскую горст-ступень (14б) и западный край Зилгахохского горста (14в). Эти структуры разделены локальными поперечными Саухохским (46) и Сбавским (47) сбросами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ специфики строения и ориентировки новейших структур послужил основой для выделения Казбекского сегмента новейшего мегасвода Большого Кавказа из состава более крупного Восточного сегмента в схеме Е.Е. Милановского. Из этой схемы сохранило значение выделение зон Северного и Южного крыльев и Центральные поднятия, а также Внешней и Внутренней подзон в Северном крыле.

Применение оротектонического метода позволило существенно детализировать предлагавшееся ранее неоструктурное районирование территории Казбекского сегмента. Большинство региональных и локальных структур разделено активными сбросами, взбросами и надвигами, которые могут быть опасны для устойчивости инженерных сооружений.

Наиболее активные разрывы связаны с региональными шовными структурами: Владикавказской флексурно-разрывной зоной, Садонской и Верхнеурухской шовно-депрессиионными зонами. Северный край Садонской зоны нарушен системой активных надвигов. Западный край сегмента определяется Безенгийским сдвигом.

Полученные оригинальные данные, отсутствующие в стандартных материалах по геологической съемке для данной территории, полезны для строительного проектирования и геоэкологии. Они были использованы, например, при инженерно-геологических исследованиях и проектировании курортно-туристического комплекса Мамисон.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горбатиков А.В., Овсяченко А.Н., Рогожин Е.А., Степанова М.Ю., Ларин Н.В. Строение зоны Владикавказского разлома по результатам изучения комплексом геолого-геофизических методов // Вопросы инженерной сейсмологии. 2010. Т. 37. № 3. С. 36–44.
2. Комплексная оценка сейсмической опасности территории г. Грозного / Сост. В.Н. Аверьянова и др.; науч. ред. С.И. Полтавцев. М.: [б. и.], 1996. 107 с.
3. Милановский Е.Е. Новейшая тектоника Кавказа. М.: Недра, 1968. 484 с.
4. Несмеянов С.А. Количественная оценка новейших движений и неоструктурное районирование горной области. М.: Недра, 1971. 144 с.
5. Несмеянов С.А. Оротектонический метод. М.: ООО "Миттель Пресс", 2017. 376 с.
6. Овсяченко А.Н., Мараханов А.В., Новиков С.С., Рогожин Е.А. Зона Владикавказского активного разлома на территории РСО-Алания // Вестник Владикавказского НЦ РАН. 2008. Т. 8. № 3. С. 44–56.
7. Рогожин Е.А., Овсяченко А.Н., Лутиков А.И., Собищев А.Л. и др. Эндогенные опасности Большого Кавказа. М.: ИФЗ РАН, 2014. 256 с.
8. Станулис В.А., Хлуднев В.Ф. Некоторые проблемные вопросы геологии и нефтеносности Терско-Сунженского района (Северный Кавказ, Терско-Каспийский краевой прогиб) // Геология и полезные ископаемые Большого Кавказа. М.: Наука, 1987. С. 246–254.
9. Шемпелев А.Г. Разломно-блоковая тектоника Северного Кавказа по геофизическим данным // Геологический журнал. 1982. Т. 42. № 4. С. 97–108.

NEOSTRUCTURAL ZONING OF THE RUSSIAN PART OF THE KAZBEK SEGMENT OF THE GREATER CAUCASUS MEGAVULT

S. A. Nesmeyanov^a, M. Yu. Nikitin^b, O. A. Voeikova^{a,#}, and M. N. Komarevskaya^a

^a*Sergeev Institute of Environmental Geoscience RAS,
Ulansky per., 13, str. 2, Moscow, 101000 Russia*

^b*Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geology,
Leninskie Gory 1, Moscow, 119899 Russia*

[#]*E-mail: voa49@mail.ru*

The Kazbek segment differs from the adjacent Central and Eastern segments of the Greater Caucasus megavault by the relative narrowing of the main zones and their latitudinal orientation. The main units of the segment comprise the zones of central elevations and northern and southern flanks. The application of orotectonic method allowed us to subdivide these zones into a number of regional and local late-stage structures separated by active faults. There are three suture zones. The pattern block structures are separated mainly by downthrows. The original data obtained, which are not presented in standard materials on geological survey, are useful for construction design and in solving geoecological tasks.

Keywords: *gorge, river valley, erosion-accumulation cycle, terrace, terrace row, orogen*

REFERENCES

1. Gorbatikov, A.V., Ovsyuchenko, A.N., Rogozhin, E.A., Stepanova, M.Yu., Larin, N.V. *Stroenie zony Vladikavkazskogo razloma po rezul'tatam izucheniya kompleksom geologo-geofizicheskikh metodov* [The structure of the Vladikavkaz fault zone according to the results of the study by a complex of geological and geophysical method]. *Voprosy inzhenernoi seismologii*, 2010, vol. 37, no. 3, pp. 36–44. (in Russian)
2. *Kompleksnaya otsenka seismicheskoi opasnosti territorii g. Groznogo* [Complex assessment of seismic hazard of the Grozny territory]. Compiled by V.N. Aver'yanova et al. S.I. Poltavtsev, Sci. Ed. Moscow, 1996. 107 p. (in Russian)
3. Milanovskii, E.E. *Noveishaya tektonika Kavkaza* [The newest tectonics of the Caucasus]. Moscow, Nedra Publ., 1968, 484 p. (in Russian)
4. Nesmeyanov, S.A. *Kolichestvennaya otsenka noveishikh dvizhenii i neostrukturnoe raionirovanie gornoj oblasti* [Quantitative assessment of the latest movements and non-structural zoning of the mountain region]. Moscow, Nedra Publ., 1971. 144 p. (in Russian)
5. Nesmeyanov, S.A. *Orotektonicheskii metod* [Orotectonic method]. Moscow, Mittel Press, 2017, 376 p. (in Russian)
6. Ovsyuchenko, A.N., Marakhanov, A.V., Novikov, S.S., Rogozhin, E.A. *Zona Vladikavkazskogo aktivnogo razloma na territorii RSO-Alaniya* [Zone of the Vladikavkaz active fault in the territory of RSO-Alania]. *Vestnik Vladikavkazskogo NC RAN*, vol. 8, no. 3, 2008, pp. 44–56. (in Russian)
7. Rogozhin, E.A., Ovsyuchenko, A.N., Lutikov, A.I., Sobisevich, A.L. et al. *Endogennye opasnosti Bol'shogo Kavkaza* [Endogenous hazards of the Greater Caucasus]. Moscow, IFZ RAN Publ., 2014, 256 p. (in Russian)
8. Stanulis, V.A., Khludnev, V.F. *Nekotorye problemnye voprosy geologii i neftenosnosti Tersko-Sunzhenskogo raiona (Severnyi Kavkaz, Tersko-Kaspiiskii kraevoi progib)* [Some problematic issues of geology and oil content of the Tersko-Sunzhenskii district (North Caucasus, Tersko-Caspian regional trough)]. *Geologiya i poleznye iskopaemye Bol'shogo Kavkaza* [Geology and mineral deposits of the Greater Caucasus]. Moscow, Nauka, 1987, pp. 246–254. (in Russian)
9. Shempelev, A.G. *Razlomno-blokovaya tektonika Severnogo Kavkaza po geofizicheskim dannym* [Fault-block tectonics of the North Caucasus according to geophysical data]. *Geologicheskii zhurnal*, 1982, vol. 42, no. 4, pp. 97–108. (in Russian)

ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ ПРИРОДНЫХ И ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 551.248.1

ВРЕМЕННЫЕ И ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПРОЯВЛЕНИЙ КРИОГЕННЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ В ЮЖНОЙ ЧАСТИ БОЛЬШЕЗЕМЕЛЬСКОЙ ТУНДРЫ В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЯЮЩЕГОСЯ КЛИМАТА

© 2023 г. А. А. Горбунова^{1,*}, Г. З. Зарипова^{1,**}, В. С. Исаев^{2,***}, В. Н. Манский^{1,****},
Р. В. Собин^{1,*****}, Д. О. Сергеев^{3,*****}, А. П. Безделова^{1,*****}

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Геологический факультет,
Ленинские горы, 1, Москва, 119991, Россия

²Научный Центр Изучения Арктики,
ул. Республики, 20, Салехард, 629007, Россия,

³Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН (ИГЭ РАН),
Уланский пер., 13, стр. 2, Москва, 101000, Россия

*E-mail: gorbunova.alina2000@yandex.ru

**E-mail: guzel.zaripova1998@yandex.ru

***E-mail: vsisaev@yanao.ru

****E-mail: parhelia1997@gmail.com

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

*****E-mail: cryo@geoenv.ru

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

Поступила в редакцию 08.02.2023 г.

После доработки 15.02.2023 г.

Принята к публикации 27.02.2023 г.

В результате мониторинговых наблюдений установлено, что повторяемость просадок на разных участках насыпи Северной железной дороги на перегоне Песец-Хановой в разные годы сопряжена с разными инженерно-геологическими условиями и ведущими криогенными процессами. Для выработки стратегии инженерной защиты трассе железной дороги требуется проведение специального геокриологического районирования территории, прилегающей к ней. Предложены критерии ранжирования участков с просадками насыпи по степени их опасности, которые разделены по пространственному и временному признакам. Выявлено, что долговременные изменения климата приводят к фоновому изменению геокриологических условий (прежде всего температурного режима горных пород), а экстремальные климатические события и переменные техногенные нагрузки вызывают активизацию или затухание криогенных процессов.

Ключевые слова: криогенные явления, тундра, изменения климата, термическая просадка

DOI: 10.31857/S0869780923020054, **EDN:** TWJZJD

Опыт строительства и эксплуатации автомобильных и железных дорог в условиях распространения многолетнемерзлых пород (ММП) показывает, что причины деформаций земляного полотна железной дороги обнаруживаются не только в насыпи и ее основании, но и в зоне ее влияния на окружающий ландшафт [13, 16].

Основными деформациями земляного полотна являются: неконтролируемые просадки и неравномерные осадки оттаивания, расползание насыпи, оползание обочин и откосов, разрушение откосов под влиянием термоэрозии, морозного пучения, наледеобразование и солифлюкция

на пологих склонах вдоль дороги [4, 15]. Для недопущения этих явлений или минимизации их влияния должны выполняться специальные обследования, которые обеспечивали бы выявление ведущего процесса и обоснование инженерной защиты [5]. Однако разового (однократного) обследования бывает недостаточно для такой диагностики. Поэтому авторы считают важным организацию комплексного мониторинга на участках с повторными деформациями. В России разрабатываются работы по организации фоновому и геотехническому мониторингу в импактных зонах геориска [12]. Эта деятельность предусматривает

организацию стационарных мониторинговых автоматизированных постов и проведение регулярных дистанционных наблюдений.

В последнее десятилетие отмечается ускорение процессов деформации автомобильных и железных дорог в криолитозоне. Это свидетельствует об активной динамике изменения состояния ММП, как в основании данных сооружений, так и в целом. Для обоснованного выбора методов инженерной защиты с учетом тенденций развития криогенных процессов должны решаться прогнозные задачи [7].

Цель статьи – изучение факторов и закономерностей проявления опасных геологических процессов, развивающихся при эксплуатации железных дорог в области распространения ММП в условиях изменяющегося климата и разработка подходов специального геокриологического районирования.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Главным методом изучения факторов и закономерностей проявления опасных геологических процессов в области распространения ММП в условиях изменяющегося климата при эксплуатации железных дорог является специальное геокриологическое районирование. Такое районирование опирается на результаты исследования ключевых участков, в предлагаемой статье – на данные, полученные на ключевом участке “Хановой” [14, 6, 3].

Мерзлотная съемка позволяет выделить основные типы местности по особенностям условий теплообмена через поверхность и криолитологического строения [5]. Маршрутное обследование заданного участка железной дороги включает в себя визуальный осмотр состояния насыпи и конструкций железной дороги и прилегающей инфраструктуры. Эта часть работ позволяет выделить участки нарушений, которые сопоставляются с типами местности, прилегающими к насыпи в полосе шириной не менее 1 км. При этом осуществляются геокриологические, геологические, геоморфологические, геоботанические, гидрогеологические и гидрологические наблюдения, позволяющие провести предварительную диагностику ведущего процесса, воздействующего на дорогу.

Попикетное описание состояния земляного полотна проводилось раз в год в сентябре на всем протяжении исследуемого участка. По результатам исследований составлялась ведомость неблагоприятных участков дороги, на каждом из которых выполнялись следующие работы:

– определение геометрических характеристик земляного полотна по поперечникам через него;

– определение состояния берм (характер поверхности, высота, вид наблюдаемых деформаций) и водоотводных сооружений (поперечный профиль и продольный уклон, который не должен быть менее 0.004);

– описание признаков деформирования пути (плановые и вертикальные деформации рельсово-шпальной решетки, свежие подсыпки дренирующего грунта на балластной призме и подсыпки грунта на откосах земляного полотна, “выплески” разжиженного тонкодисперсного грунта между шпалами, оплывины на откосах насыпи).

Заметим, что ремонт пути проводится нерегулярно, и отсутствие точной информации о нем не дает однозначных данных о суммарной многолетней величине просадок насыпи. Поэтому каждый год описание просадки делалось без оглядки на предыдущие наблюдения.

Проводилось описание состояния полосы отвода дороги по поперечникам в крест линии пути на участках с нарушениями устойчивости насыпи. При этом фиксировались:

– растительные сообщества и характер их взаимных переходов вдоль поперечника;

– следы техногенных нарушений ландшафтов (в том числе колеи от движения транспорта);

– участки подтопления и затопления поверхности;

– высыпки техногенного грунта;

– формы микрорельфа, обусловленные проявлениями геокриологических процессов;

– наблюдения за глубиной оттаивания пород в полосе отвода по поперечнику через насыпь.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Наземное обследование 10-километрового участка Северной железной дороги между станциями Песец и Хановой проводилось в 2017, 2021 и 2022 г. для определения причин деформаций конструкций железнодорожного пути, выявления ареалов развития криогенных процессов и явлений в земляном полотне, а также для наблюдений за техногенными изменениями окружающих природных ландшафтов, которые могут стать причинами развития процессов деформирования дороги в будущем.

Выделены основные типы деформаций железнодорожного полотна.

Первый тип: сопряженные малоамплитудные пучины и просадки, образующие “волнистость” пути с вертикальными амплитудами до 0.3 м и длиной волны 50–150 м. Они могут быть следствием инъекционного и миграционного морозного пучения при промерзании обводненных пород в несквозных таликах и ваннах глубокого оттаивания, образовавшихся в основании земля-



Рис. 1. Серия малоамплитудных просадок первого типа, сформировавшихся предположительно в результате неравномерного оттаивания льдистых грунтов (2022 г.).



Рис. 2. Высокоамплитудная просадка второго типа, сформировавшаяся предположительно в результате оттаивания льдистых грунтов на границе блока-бугра (2022 г.).

ного полотна. Также сопряженные волнообразные просадки земляного полотна могут быть связаны с оттаиванием маломощных полигонально-жильных льдов в пределах мерзлых блоков-бугров (рис. 1).

Второй тип: единичные крупные просадки земляного полотна, которые образовались в результате оттаивания льдистых грунтов. Их глуби-

на составляет 0.2–1.0 м при протяженности вдоль пути от 30 до 300 м и более (рис. 2).

Третий тип: единичные крупные просадки земляного полотна на талых участках, которые образовались в результате объемных деформаций ранее оттаявших грунтов. Их глубина составляет 0.2–1.0 м при протяженности вдоль пути от 30 до 300 м и более (рис. 3).



Рис. 3. Высокоамплитудная протяженная просадка третьего типа (на заднем плане), сформировавшаяся по высокой насыпи на пересечении железной дороги с водотоком над таликовой зоной; на переднем плане – малоамплитудная просадка первого типа на участке примыкания насыпи к блоку-бугру (2022 г.).

На Северной железной дороге, в пределах области развития ММП, преобладают сопряженные малоамплитудные пучины и просадки первого типа, а также термокарстовые просадки земляного полотна, хотя возможны также эрозионный бороздчатый размыв и микрооползни на откосах насыпи.

По материалам поикетного описания земляного полотна проведена качественная оценка его состояния на основе анализа протекающих инженерно-геокриологических процессов и мерзлотно-грунтовой обстановки в грунтах земляного полотна, основания и в полосе отвода железной дороги.

Данные, полученные в результате обследования, занесены в таблицы оценки геокриологической опасности (табл. 1).

Оценка опасности складывается из двух групп независимых показателей – пространственной и временной. К пространственным показателям относятся:

- протяженность участка с деформациями (чем он длиннее, тем ситуация хуже);
- глубина просадки (чем глубже и короче протяженность просадки, тем ситуация хуже).

Оцениваемый участок земляного полотна на карте помечался специальным знаком “опасные” (аналог красного светофора), если глубина или протяженность росла со временем или если глубина была больше 0.5 м при протяженности меньше 100 м. Если величины просадок оказывались меньше, то оцениваемый участок помечался вторым специальным знаком – “умеренно опасные” (аналог оранжевого светофора). Если каких-либо геометрических данных не указано, то оцениваемый участок помечался третьим специальным

знаком – “малоопасные” (аналог желтого светофора).

К временным показателям относятся:

- актуальность просадки (просадки 2022 г. “хуже” произошедших ранее) и ее повторяемость (чем выше повторяемость просадки, тем ситуация “хуже”);
- примыкание насыпи к участкам с заведомо неблагоприятными условиями (льдистый грунт, нарушения естественного стока у подножья насыпи, проявление криогенных, склоновых и эрозионных процессов, снижение несущей способности грунта при переувлажнении).

Приведенная на рис. 4 карта-схема геокриологических опасностей участка Северной железной дороги составлена с учетом обновления предыдущих вариантов районирования и позволяет сопоставить характеристики нарушений насыпи железнодорожного пути с условиями развития криогенных процессов по времени [2].

Оцениваемый участок земляного полотна на карте помечался специальным знаком – “опасные” (аналог красного светофора), если просадка повторялась многократно при примыкании к участкам насыпи с заведомо неблагоприятными условиями. Вторым специальным знаком – “умеренно опасные” (аналог оранжевого светофора), – помечались просадки 2022 г. при примыкании к участкам насыпи с заведомо неблагоприятными условиями. Третьим специальным знаком – “малоопасные” (аналог желтого светофора), – помечались исторические просадки, произошедшие ранее 2022 г.

Таблица 1. Характеристика просадок насыпи железной дороги (н/д – “нет данных”)

Номер участка с просадкой (см. рис. 4)	Неблагоприятные условия в окрестности насыпи	Размер просадки		Число лет активности просадки	Опасность просадки
		глубина (по годам)	протяженность (по годам)		
1	Заболоченные участки	2021 г. – 0.4 м 2022 г. – 0.3 м	2021 г. – 100 м 2022 г. – 100 м	2	Умеренно опасная
2	Мерзлые блоки-бугры	н/д	2021 г. – 60 м	1	Малоопасная
3	–	н/д	2021 г. – 8 м	1	Малоопасная
4	Термокарстовое озеро справа от полотна ж/д, минеральные бугры; полоса стока без водопропуска	2017 г. – н/д 2021 г. – 0.5 м 2022 г. – 0.6 м	2017 г. – 100 м 2021 г. – 120 м 2022 г. – 100 м	3	Опасная
5	Концентрация стока (рядом с водопрпуском)	2021 г. – 0.3 м 2022 г. – 0.4 м	2021 г. – 100 м 2022 г. – 100 м	2	Опасная
6	Термокарстовое озеро	2020 г. – 0.3 м 2021 г. – н/д 2022 г. – 0.5 м	2020 г. – н/д 2021 г. – 170 м 2022 г. – 100 м	3	Опасная
7	Термокарстовое озеро	н/д	2017 г. – 100 м	1	Малоопасная
8	Концентрация стока (водопрпуски нет)	2021 г. – 0.5 м 2022 г. – 0.4 м	2021 г. – 40 м 2022 г. – 50 м	2	Опасная
9	С обеих сторон насыпи прилегают мерзлые блоки-бугры; термокарстовое озеро	2017 г. – н/д 2022 г. – 0.3 м	2017 г. – 110 м 2022 г. – 60 м	2	Умеренно опасная
10	Рядом водопрпуск ручья; грунты основания тиксотропные	2021 г. – 0.4 м 2022 г. – 1.2 м	2021 г. – 40 м 2022 г. – 250 м	2	Опасная
11	Мерзлые блоки-бугры	2022 г. – 0.3 м	2022 г. – 50 м	1	Умеренно опасная
12	Мерзлые блоки-бугры	2021 г. – 0.4 м	2021 г. – 50 м	1	Умеренно опасная
13	С обеих сторон насыпи прилегают мерзлые блоки-бугры	2017 г. – н/д 2021 г. – 0.3 м 2022 г. – 0.4 м	2017 г. – 300 м 2021 г. – 30 м 2022 г. – 60 м	3	Опасная
14	Мерзлые блоки-бугры	2021 г. – 0.2 м	2021 г. – 30 м	1	Умеренно опасная
15	Мерзлый блок-бугор; в 100 м – водопрпуски	н/д	2017 г. – 30 м	1	Малоопасная
16	Мерзлые блоки-бугры	2017 г. – н/д 2021 г. – 0.65 м; 2022 г. – 0.3 м	2017 г. – 110 м 2021 г. – 40 м 2022 г. – 40 м	3	Умеренно опасная
17	Термокарстовое озеро	2017 и 2021 г. – н/д; 2022 г. – 0.3 м	2017 г. – 30 м 2021 г. – 35 м; 2022 г. – 50 м	3	Опасная
18	Водопрпуск в 70 м; термокарстовое озеро	2021 г. – 0.4 м	2021 г. – 40 м	1	Умеренно опасная
19	Термокарстовое озеро	н/д	2021 г. – 40 м	1	Малоопасная
20	В 15 м от водопрпуски	2021 г. – 0.3 м	2021 г. – 120 м	1	Малоопасная
21	–	2022 г. – 0.3 м	2022 г. – 30 м	1	Умеренно опасная
22	Мерзлые блоки-бугры	н/д	2021 г. – 30 м	1	Малоопасная
23	Мерзлые блоки-бугры	2021 г. – 0.2 м 2022 г. – 0.5 м	2021 г. – 300 м 2022 г. – 110 м	2	Опасная
24	Водопрпуск в 50 м	2021 г. – 0.05 м	2021 г. – 20 м	1	Умеренно опасная

Таблица 1. Окончание

Номер участка с просадкой (см. рис. 4)	Неблагоприятные условия в окрестности насыпи	Размер просадки		Число лет активности просадки	Опасность просадки
		глубина (по годам)	протяженность (по годам)		
25	Термокарстовое озеро	2017 г. – н/д 2021 г. – 0.1 м 2022 г. – 0.4 м	2017 г. – 70 м 2021 г. – 60 м 2022 г. – 50 м	3	Опасная
26	Мерзлые блоки-бугры и термокарстовое озеро	н/д	2017 г. – 130 м	1	Малоопасная
27	Водопропуск в 20 м	2017 г. – н/д 2022 г. – 0.04 м	2017 г. – 20 м 2022 г. – 160 м	2	Умеренно опасная
28	Термокарстовое озеро	н/д	2017 г. – 15 м	1	Малоопасная
29	Над водопропуском	2017 г. – н/д 2021 г. – 0.2 м 2022 г. – 0.7 м	2017 г. – 20 м 2021 г. – 180 м 2022 г. – 90 м	3	Опасная
30	Мерзлые блоки-бугры и термокарстовое озеро	н/д	2017 г. – 100 м	1	Малоопасная
31	Термокарстовое озеро	2022 г. – 0.4 м	2022 г. – 110 м	1	Умеренно опасная
32	Мерзлые блоки-бугры	2021 г. – 0.2 м	2021 г. – 360 м	1	Умеренно опасная
33	Мерзлые блоки-бугры	н/д	2017 г. – 110 м	1	Малоопасная
34	В 100 м от водопропуска	н/д	2017 г. – 50 м	1	Малоопасная
35	Над водопропуском	н/д	2017 г. – 55 м	1	Малоопасная

ОБСУЖДЕНИЕ

Строительство ж/д линии Инта–Воркута и ее последующая эксплуатация вызвали существенные изменения мерзлотной обстановки. Это обусловлено нарушением теплообмена поверхности земли с атмосферой на участках, прилегающих к насыпи железной дороги.

Рассмотрим основные факторы, влияющие на температурный режим и устойчивость насыпи в данном районе.

Снегонакопление. Насыпь, как положительная форма рельефа, оказывает существенное влияние на снегонакопление в условиях выраженного метелевого переноса снега. Поскольку снежный покров в данных природных условиях – один из основных температурообразующих факторов, то его необходимо обязательно учитывать. Кроме того, необходимо учитывать экспозицию откоса (на южных участках оттаивание выше).

Режим надмерзлотных вод сезонно-талого слоя (СТС). Рассматриваемый участок расположен на слабонаклонной поверхности, поэтому в дренажных канавах вдоль дороги аккумулируется поверхностный сток с вышележащего склона. Под действием статической и динамической нагрузки насыпи происходит снижение фильтрационной способности грунтов в ее основании. Дорожная насыпь, таким образом, создает преграду на пути фильтрующихся надмерзлотных вод. Чем более

интенсивным будет сток на участке насыпи, тем больше будет воды у насыпи за счет барражного эффекта, что может приводить в южных регионах криолитозоны к дополнительному оттаиванию ММП.

Тепловое влияние инфильтрации летних дождевых осадков. Наблюдения показали, что в годы с жарким дождливым летом на данном участке просадки насыпи увеличиваются. Избыточное количество влаги, скапливающееся у подножья насыпи и на прилегающих к ней территориях в результате ухудшения условий стока, увеличения прихода атмосферных осадков и снижения транспирации, может вызвать повышение уровня грунтовых вод вплоть до поверхности земли. Все это приводит к заболачиванию и появлению подпрудных озер (которые превращаются со временем в термокарстовые), которые были зафиксированы при маршрутных наблюдениях на участке между станциями Хановой и Песец.

Водотоки. Рядом с водопропускными сооружениями также наблюдались деформации. Как показали данные геофизических исследований, у большинства водотоков формируется таликовая зона мощностью от 2 до 10 м.

Постепенное “фоновое” оттаивание ММП, наблюдающееся на протяжении последнего столетия, создало условия для высокой реактивности геокриологических условий при техногенных нагрузках. При этом аномальные погодные усло-



Рис. 4. Карта-схема опасности просадок участка Северной железной дороги (составители А.А. Горбунова, Г.З. Зарипова, В.Н. Манский, В.С. Исаев, Д.О. Сергеев).

вия (теплые летние сезоны или холодные зимы) существенно влияют на проявления криогенных процессов. Так, эксплуатационные службы отмечали активизацию просадок в 1953, 1959, 1966, 1968 и в 2008 г. Холодные зимы (например, зима 2020–2021 гг.) притормаживают этот процесс, но благоприятствуют формированию пучин.

В результате анализа данных можно сделать вывод, что осадки при оттаивании не являются единственной причиной деформации железнобетонного полотна, так как в данном районе распространены преимущественно эпикриогенные грунты, которые не обладают высокой льдистостью. Экспериментальные исследования по определению деформационных характеристик оттаивающих грунтов не проводились. Однако осадки оценивались по регрессионной формуле, предложенной на основе обобщения данных испытаний грунтов на севере Европейской части и Западной Сибири [11]. Осадки при влажности суглинка 25–35% составляют от 7 до 11 см при оттаивании 1 м мерзлого грунта. Таким образом, требуется рассмотреть и другие процессы, которые воздействуют на устойчивость насыпи.

Как показали данные бурения в изучаемом районе, суглинки могут содержать линзы льда [9]. Мощность линз невелика и составляет первые десятки сантиметров, что в некоторой степени объясняет наличие высокоамплитудных осадков насыпи.

Динамические нагрузки на пылеватые оттаивающие обводненные грунты, которые могут превращаться в “пльвуны”, также могут увеличивать вертикальные деформации насыпи. В совокупности с повышенной влажностью грунтов под насыпью и воздействием динамической нагрузки от поездов могут проявиться тиксотропия в талых грунтах и их выдавливание из-под насыпи под воздействием динамической и статической нагрузок. Так, при полевых исследованиях были обнаружены пятна медальоны, характеризующиеся тиксотропными свойствами, размером от 0.3 до 0.8 м. Эти же образования предположительно находятся под насыпью и деформируются. Перераспределение напряжений, возникающее в грунте под насыпью, также является одним из факторов, значительно влияющим на деформации мерзлых грунтов при оттаивании, помимо их криогенного строения, влажности, льдистости, плотности [10].

На фоне формирования многолетней чаши оттаивания в нижних частях откосов насыпи и прилегающей полосе тундры возможно развитие криогенного пучения. Наличие этого процесса вполне объясняет зафиксированные просадки ж/д пути при достаточно малой влажности. Просадки начинаются в конце августа, но основная часть происходит в сентябре–октябре, так как

именно в это время наблюдается максимальная глубина сезонного оттаивания, что подтверждается данными математического моделирования. Однако в зимний период значительная часть величины осадков компенсируется морозным пучением оттаявших грунтов. Следует отметить, что на БАМе именно эти два процесса (осадки при оттаивании и сезонное пучение в условиях замкнутых криогенных систем) приводят к формированию сопряженных малоамплитудных пучин и просадок, на долю которых приходится почти половина деформирующегося пути [1]. В районе Северной железной дороги также наблюдались деформации пучения вследствие принудительного охлаждения грунтов насыпи термостабилизирующими системами (участок пересечения полотна Северной железной дороги подземным газопроводом ООО “Газпром Трансгаз Ухта” в районе железнодорожной станции Песец).

На процессы пучения и осадки оказывают влияние и особенности строения насыпей Северной железной дороги. Слой плотного песка, из которого состояла первая насыпь, и сейчас находящийся в центре насыпной призмы, имеет мощность 1–3 м. Сильно уплотненные, насыщенные водой прослой пылеватых песков при промерзании в осенне-зимний период превращаются в сезонно-мерзлые сильнольдистые горизонты. При оттаивании таких горизонтов могут происходить их локальное разуплотнение и выдавливание под динамической нагрузкой, что и приводит к дополнительной деформации сооружения насыпи.

ВЫВОДЫ

Установлено, что повторяемость просадок на разных участках насыпи железной дороги в разные годы сопряжена с разными инженерно-геологическими условиями и ведущими криогенными процессами. Поэтому для выработки стратегии инженерной защиты железной дороги требуется специальное геокриологическое районирование прилегающей территории. Предложены критерии ранжирования участков с просадками насыпи по степени их опасности, которые разделены по пространственному и временному признакам.

Основными причинами деформаций насыпи признаны осадки при оттаивании и деформации пылеватых переувлажненных грунтов на талых участках.

Разработанные подходы специального геокриологического районирования, применяемые совместно с организацией геотехнического и геокриологического мониторинга, а также с разработкой геокриологического прогноза, позволяют обосновать диагностику ведущего процесса, нарушающего инженерный объект, а также оценить значение долговременных тенденций и экстре-

мальных климатических и техногенных воздействий в изменении активности криогенных процессов. В частности, выявлено, что долговременные изменения климата приводят к фоновому изменению геокриологических условий (прежде всего температурного режима горных пород), а экстремальные климатические события и переменные техногенные нагрузки вызывают активизацию или затухание криогенных процессов.

Для эталонного участка рекомендуется разработать проект геотехнического мониторинга опасных геологических процессов с детальным алгоритмом выбора:

- комплексируемых методов инженерно-геологических изысканий;
- систем инструментального контроля динамики опасных геологических процессов;
- прогнозных расчетов изменения тепловых полей в теле железнодорожной насыпи и в основании железнодорожного полотна;
- технических решений стабилизации грунтов основания железнодорожной насыпи в зоне распространения многолетнемерзлых пород.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Афанасенко В.Е., Гарагуля Л.С., Нистратова Т.А., Оспенников Е.Н. Развитие опасных геокриологических процессов на Центральном участке БАМ // Геоэкология. 1995. № 4. С. 70–81.
2. Войтенко А.С. Применение геокриологического районирования природно-технических систем для обоснования мероприятий инженерной защиты (на примере арктического участка Северной железной дороги): дис. ... канд. геол.-мин. н., М., 2017. 159 с.
3. Исаев В.С., Безделова А.П., Сергеев Д.О. Комплексный ландшафтный мониторинг многолетней мерзлоты в южной тундре (на примере полигона Хановей) // Современные исследования трансформации криосферы и вопросы геотехнической безопасности сооружений в Арктике. Под ред. В.П. Мельникова и М.Р. Садуртдинова. — Салехард: 2021, с. 173–176.
<https://doi.org/10.7868/9785604610848045>
4. Исаков В.А. Влияние криогенных процессов на устойчивость автомобильных и железных дорог: дис. ... канд. геол.-мин. н., М., 2016.
5. Методика мерзлотной съемки / Под ред. В.А. Кудрявцева. М.: Изд-во МГУ, 1979. 354 с.
6. Уварова А.В., Исаев В.С., Комаров И.А., Сергеев Д.О. и др. Результаты геотехнического мониторинга на учебно-научном полигоне Хановей // Мониторинг в криолитозоне: сб. статей [электронное издание сетевого распространения] / Под ред. Р.Г. Мотенко. М.: “КДУ”, “Добросвет”, 2022. С. 343–347.
<https://doi.org/10.31453/kdu.ru.978-5-7913-1231-0-2022-1130>
7. Хименков А.Н., Халилова Ю.В., Сергеев Д.О., Перльштейн Г.З., Угаров А.Н. Проблемы получения и использования актуальной информации о развитии геологических процессов при мониторинге трасс линейных объектов большой протяженности // Геоэкология. 2013. № 3. С. 264–271.
8. Isaev V., Komarov I., Uvarova A., Koshurnikov A., Sergeev D. et al. Results of Geotechnical monitoring at the scientific test site “Khanovey” in the North East part of Russian Arctic / Proc. Conf. AGU FALL MEETING 2022. <https://agu.confex.com/agu/fm22/meetingapp.cgi/Paper/1066056>
9. Isaev V., Kotov P., Sergeev D. Technogenic hazards of russian north railway // Lecture Notes in Civil Engineering. Vol. 1 (49). 2020. P. 311–320.
10. Kotov P.I., Roman L.T., Sakharov I.I., Paramonov V.N., Paramonov M.B. Influence of thawing conditions and type of testing on deformation characteristics of thawing soil // Soil Mechanics and Foundation Engineering. 2015. V. 52 (5). P. 254–261.
<https://doi.org/10.1007/s11204-015-9337-5>
11. Kotov P.I., Roman L.T., Tsarapov M.N. Forecast settlement of frozen soils after thawing, J. Heilongjiang Univ. Eng. 2014. V. 5. N 3. P. 1–5.
12. Melnikov V.P., Osipov V.I., Brouchkov A.V., Badina C.B., et al. Past and Future of Permafrost Monitoring: Stability of Russian Energetic Infrastructure // Energies. 2022. T. 15. № 9. С. 3190.
<https://doi.org/10.3390/en15093190>
13. Povoroznyuk O., Vincent W.F., Schweitzer P., Laptander R. et al. Arctic roads and railways: social and environmental consequences of transport infrastructure in the Circumpolar North // Arctic Science, 11 August 2022.
<https://doi.org/10.1139/AS-2021-0033>
14. Rossi M., Dal Cin M., Picotti S., Gei D., Isaev V.S. et al. Active Layer and Permafrost Investigations Using Geophysical and Geocryological Methods—A Case Study of the Khanovey Area, Near Vorkuta, in the NE European Russian Arctic // Frontiers in Earth Science. 2022. T. 10. С. 910078–910078.
<https://doi.org/10.3389/feart.2022.910078>
15. Sergeev D. Permafrost-Related Geohazards in Cold Russian Regions // Natural Hazard Science. 2018. <http://naturalhazardscience.oxfordre.com/view/10.1093/acrefore/9780199389407.001.0001/acrefore-9780199389407-e-291>
16. Voytenko A., Sergeev D., Chesnokova I. The main directions of securing geocryological safety of economic activity in the Arctic region. Heininen, L.H. Exner-Pirot, and J. Barnes (eds.) Redefining Arctic Security: Arctic Yearbook, 2019. Akureyri, Iceland: Arctic Portal. <https://www.arcticyearbook.com>, pp. 210–216.

TEMPORAL AND SPATIAL PATTERNS OF PERMAFROST PHENOMENA ALONG OPERATED RAILROAD IN THE SOUTHERN PART OF BOLSHEZEMELSKAYA TUNDRA UNDER A CHANGING CLIMATE

A. A. Gorbunova^{a,#}, G. Z. Zaripova^{a,##}, V. S. Isaev^{b,###}, V. N. Manskii^{a,####}, R. V. Sobin^{a,#####}, D. O. Sergeev^{c,#####}, and A. P. Bezdelova^{a,#####}

^aGeological Faculty, Lomonosov Moscow State University,
Leninskie gory, 1, Moscow, 119991 Russia

^bReserch Center for the Arctic Study,
ul. Respubliki, 20, Salekhard, 629007 Russia

^cSergeev Institute of Environmental Geoscience RAS
Ulanskii per., 13, str.2, Moscow, 101000 Russia

[#]E-mail: gorbunova.alina2000@yandex.ru

^{##}E-mail: guzel.zaripova1998@yandex.ru

^{###}E-mail: vsisaev@yanao.ru

^{####}E-mail: parhelia1997@gmail.com

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

^{#####}E-mail: cryo@geoenv.ru

^{#####}E-mail: abezdelova@mail.ru

As a result of monitoring observations, it was found that the frequency of subsidence in different sections of the railway embankment in different years is associated with different engineering and geological conditions and leading cryogenic processes. It requires the special geocryological zoning of the territory adjacent to the railway to develop an engineering protection strategy. The criteria for ranking areas with embankment settlements according to their hazard degree, which are divided according to spatial and temporal characteristics are proposed. It was revealed that the long-term climate changes lead to a regional change in geocryological conditions (primarily the temperature regime of soil). The extreme climatic events and variable technogenic loads cause activation or attenuation of cryogenic processes.

Keywords: *permafrost phenomena, tundra, climate change, thermal settlement*

REFERENCES

1. Afanasenko, V.E., Garagulya, L.S., Nistratova, T.A., Ospennikov, E.N. *Razvitie opasnykh geokriologicheskikh protsessov na Tsentral'nom uchastke BAM* [Development of hazardous geocryological processes in the Central section of BAM]. *Geoekologiya*, 1995, no. 4, pp. 70–81. (in Russian)
2. Voitenko, A.S. *Primenenie geokriologicheskogo raionirovaniya prirodno-tekhnicheskikh sistem dlya obosnovaniya meroriyatii inzhenernoi zachshity (na primere arkticheskogo uchastka Severnoi zheleznoi dorogi)* [Application of geocryological zoning of natural anthropogenic systems to justify engineering protection measures (by the example of the Arctic section of the Northern Railway)]. Cand. Sci. (Geol.-min.) dissertation, Moscow, 2017, 159 p. (in Russian)
3. Isaev, V.S., Bezdelova, A.P., Sergeev, D.O. *Kompleksnyi landshaftnyi monitoring mnogoletnei merzloty v yuzhnoi tundre (na primere poligona Khanovei)* [Combined landscape monitoring of permafrost in the southern tundra (by the example of the Khanovei test site)]. *Sovremennye issledovaniya transformatsii kriosfery i voprosy geotekhnicheskoi bezopasnosti sooruzhenii v Arktike* [Current studies in the cryosphere transformation and issues of geotechnical safety of structures in the Arctic]. V.P. Melnikov and M.R. Sadurtdinov, Eds. Salekhard, 2021, pp. 173–176.
<https://doi.org/10.7868/9785604610848045>. (in Russian)
4. Isakov, V.A. *Vliyanie kriogennykh protsessov na ustoichivost avtomobil'nykh i zheleznykh dorog* [Influence of cryogenic processes on the sustainability of automobiles and railways]. Cand. Sci. (Geol.-min.) dissertation, Moscow, 2016. (in Russian)
5. *Metodika merzlotnoi s'emki* [Permafrost survey technique]. V. A. Kudryavtsev, Ed., Moscow, MGU Publ., 1979, 354 p. (in Russian)
6. Uvarova, A.V., Isaev, V.S., Komarov, I.A., Sergeev, D.O. et al. *Rezultaty geotekhnicheskogo monitoringa na uchebno-nauchnom poligone Khanovei* [Results of geotechnical monitoring at the educational and scientific point of Khanovey]. *Monitoring v kriolitozone* [Monitoring in the permafrost zone]. R.G. Motenko, Ed., Moscow, KDU, Dobrosvet Publ., 2022, pp. 343–347. [Electronic edition of network distribution].
<https://doi.org/10.31453/kdu.ru.978-5-7913-1231-0-2022-1130> (in Russian)
7. Khimenkov, A.N., Khalilova, Yu.V., Sergeev, D.O., Pershtein, G.Z., Ugarov, A.N. *Problemy polucheniya i ispol'zovaniya aktual'noi informatsii o razvitiu geologicheskikh protsessov pri monitoringe trass lineinykh ob'ektov bol'shoi protyazhennosti* [Problems of obtaining and using up-to-date information on the development of geological processes upon monitoring routes of long linear

- structures]. *Geoekologiya*, 2013, no. 3, pp. 264–271. (in Russian)
8. Isaev, V., Komarov, I., Uvarova, A., Koshurnikov, A., Sergeev, D., et al. Results of geotechnical monitoring at the scientific test site “Khanovey” in the North East part of Russian Arctic. Proc. Conf. AGU fall meeting 2022. <https://agu.confex.com/agu/fm22/meetingapp.cgi/Paper/1066056>.
 9. Isaev, V., Kotov P., Sergeev D. Technogenic hazards of Russian North railway. *Lecture Notes in Civil Engineering*, 2020, vol. 1 (49), pp. 311–320.
 10. Kotov, P.I., Roman, L.T., Sakharov, I.I., Paramonov, V.N., Paramonov, M.B. Influence of thawing conditions and type of testing on deformation characteristics of thawing soil. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2015, vol. 52 (5), pp. 254–261. <https://doi.org/10.1007/s11204-015-9337-5>
 11. Kotov, P.I., Roman, L.T., Tsarapov, M.N. Forecast settlement of frozen soils after thawing, *J. Heilongjiang Univ. Eng.*, 2014, vol. 5, no. 3, pp. 1–5.
 12. Melnikov, V.P., Osipov, V.I., Brouchkov, A.V., Badina, S.V. et al. Past and future of permafrost monitoring: stability of Russian energetic infrastructure. *Energies*, 2022, vol. 15, no. 9, pp. 3190. <https://doi.org/10.3390/en15093190>
 13. Povoroznyuk, O., Vincent, W.F., Schweitzer, P., Laptander, R., et al. Arctic roads and railways: social and environmental consequences of transport infrastructure in the Circumpolar North. *Arctic Science*, 11 August 2022. <https://doi.org/10.1139/AS-2021-0033>
 14. Rossi, M., Dal Cin, M., Picotti, S., Gei, D., Isaev, V.S., et al. Active layer and permafrost investigations using geophysical and geocryological methods—a case study of the Khanovey area, near Vorkuta, in the NE European Russian Arctic. *Frontiers in Earth Science*, 2022, vol. 10, pp. 910078–910078. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.910078>
 15. Sergeev, D. Permafrost-related geohazards in cold Russian Regions. *Natural hazard science*. 2018. <http://naturalhazardscience.oxfordre.com/view/10.1093/acrefore/9780199389407.001.0001/acrefore-9780199389407-e-291>
 16. Voytenko, A., Sergeev, D., Chesnokova, I. The main directions of securing geocryological safety of economic activity in the Arctic region. Heininen, L.H. Exner-Pirot, J. Barnes, Eds., *Redefining Arctic Security: Arctic Yearbook*, 2019, pp. 210–216. Akureyri, Iceland: Arctic Portal. <https://www.arcticyearbook.com>

УДК 551.3 (470.57)

НЕТРАДИЦИОННЫЕ ТИПЫ КАРСТА ЮЖНОГО УРАЛА И ПРЕДУРАЛЬЯ

© 2023 г. А. И. Смирнов

*Институт геологии Уфимского федерального исследовательского Центра Российской академии наук
ул. Карла Маркса, 16/2, Уфа, Республика Башкортостан, 450077 Россия*

E-mail: smalil@mail.ru

Поступила в редакцию 10.02.2023 г.

После доработки 30.03.2023 г.

Принята к публикации 14.04.2023 г.

“Нетрадиционные” типы карста – редко встречающиеся и ограниченные в развитии на рассматриваемой территории типы карста. Установлено, что наряду с широким распространением сульфатного и карбонатного карста в регионе ограниченно развит кластокарст, карст известковых туфов, сульфидный, соляной карст и карст в мраморах. Для каждого из этих типов карста по составу карстующихся пород определены условия и факторы их развития. Наименее распространен в рассматриваемом регионе карст известковых туфов и карст в мраморах, наиболее – кластокарст. Нетрадиционные типы карста имеют как положительное, так и отрицательное практическое значение. Карст известковых туфов является самым примечательным и уникальным проявлением редкого типа карста рассматриваемого региона, представленный комплексным памятником природы – “Урочище Шумиловский водопад”. Отрицательное воздействие кластокарста на объекты экономики и жизнедеятельность человека соизмеримо с воздействием самого распространенного и опасного в регионе сульфатного карста, что должно учитываться при проектировании и строительстве новых зданий и инженерных сооружений. Соляной карст связан с искусственным выщелачиванием поваренной соли с целью ее добычи для производства кальцинированной соды, а сформированные при этом пустоты эксплуатируются как подземные хранилища нефтепродуктов. Поверхностные проявления сульфидного карста могут являться поисковым признаком новых медно-колчеданных месторождений.

Ключевые слова: *кластокарст, карст известковых туфов, сульфидный карст, соляной карст, Республика Башкортостан*

DOI: 10.31857/S0869780923030104, **EDN:** WNEXSG

ВВЕДЕНИЕ

Наряду с широко распространенными на Южном Урале и в Предуралье сульфатным и карбонатным карстом, в регионе встречаются нетрадиционные его типы. Определяющими для их выделения являются редкая встречаемость и ограниченное распространение форм их проявлений. К ним автор относит: кластокарст, сульфидный карст, карст известковых туфов и карст в мраморах (рис. 1). К редкому типу карста рассматриваемого региона можно также отнести соляной карст, развивающийся в глубоких горизонтах недр (более 800 м) и не проявляющийся на поверхности.

Для каждого выделенного нетрадиционного типа карста установлены условия и определяющие факторы интенсивности распространения форм его проявления и активности развития. Ранее автором опубликованы статьи, характеризующие отдельные редкие типы карста региона [24–26], сводные же данные по ним с дополнением

особенностей развития нетрадиционных типов карста района исследований приводятся впервые.

Цель исследований – определение и сводная характеристика нетрадиционных типов карста Южного Урала и Предуралья, установление основных условий и факторов их распространения и активности развития, оценка научного и практического значения.

Исходными материалами для исследования послужили сведения, содержащиеся в производственных отчетах ОАО “Башкиргеология” по изучению экзогенных геологических процессов (ЭГП) на территории Республики Башкортостан (РБ) 1983–1994 гг. (отв. исп. А.И. Смирнов), актуализированные современные данными автора 2018–2022 гг. Автором из опубликованных, фоновых и архивных источников, а также собственных полевых исследований собраны и систематизированы сведения о современных карстовых

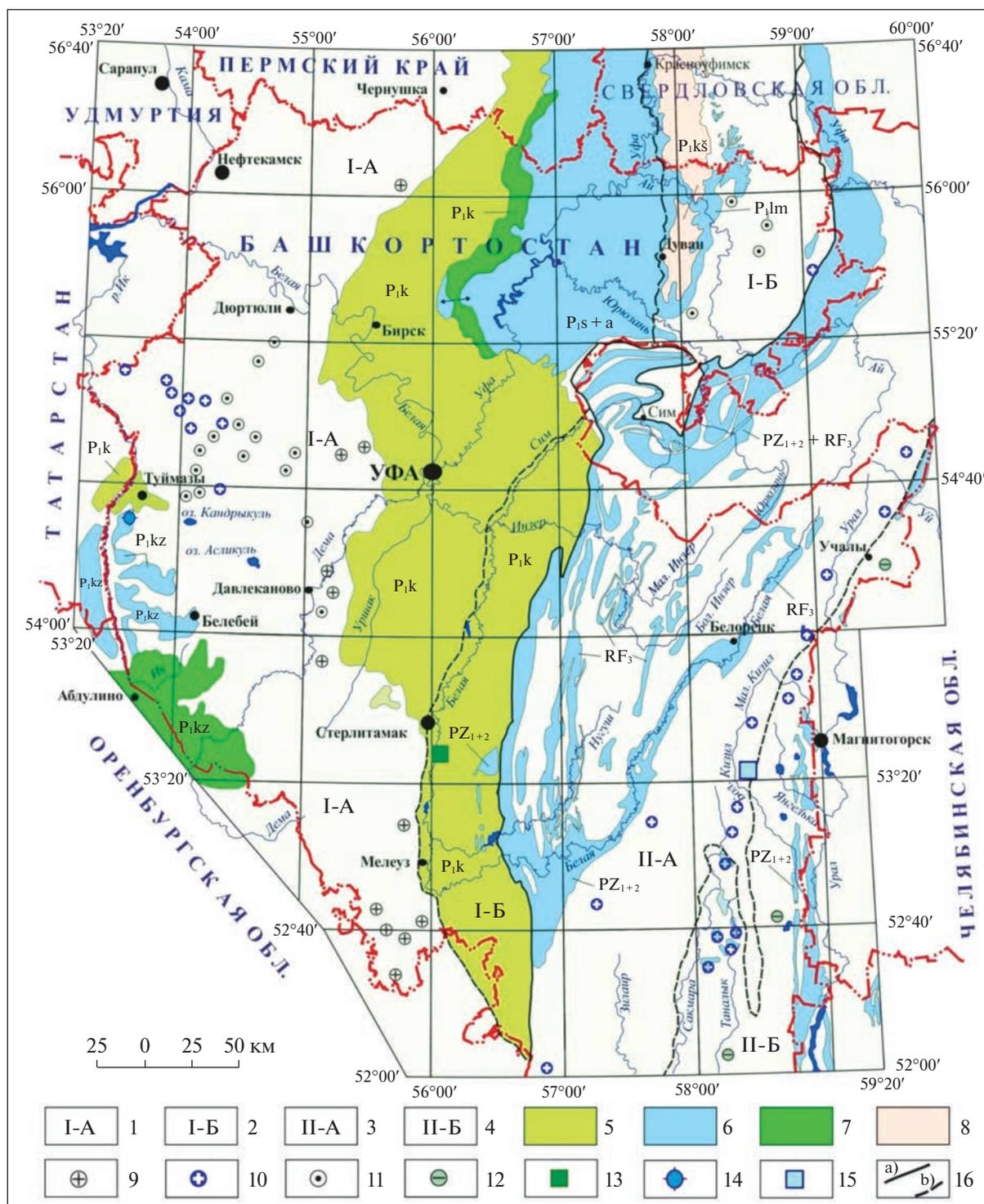


Рис. 1. Типы карста Южного Урала и Предуралья (по [19]). Карстовая страна Восточно-Европейской равнины (I): 1 – (I-A) равнинный карст в горизонтально и пологозалегающих породах Предуралья; 2 – (I-B) равнинный и предгорный карст Предуралья в пологозалегающих и слабо дислоцированных породах. Уральская карстовая страна (II): 3 – (II-A) горный и предгорный карст в дислоцированных и сильно дислоцированных образованиях Урала; 4 – (II-B) равнинный карст в складчато-глыбовых отложениях Зауралья. Типы карста (в соответствии с распространением карстопроявлений): 5 – сульфатный, 6 – карбонатный, 7 – сульфатно-карбонатный, 8 – кластокарст. Локальные проявления карста: 9 – сульфатного, 10 – карбонатного, 11 – кластокарста, 12 – сульфидного, 13 – соляного на Яр-Бишкадакском месторождении поваренной соли, 14 – известковых туфов (Шумиловский водопад), 15 – в мраморах (Амангильдинский карьер). 16 – границы: а) – карстовых стран, б) – типов карста по характеру рельефа и условиям залегания пород.

провалах Южного Урала и Предуралья в границах РБ за последние 100 лет [17].

Методы исследований — стандартные при изучении закарстованных территорий согласно действующим нормативным документам.

КЛАСТОКАРСТ

Термин кластокарст введен в научную литературу Г.А. Максимовичем для обозначения явлений химического и механического воздействия (растворение и суффозия) подземных вод на осадочные породы (глины, суглинки, лессы, песчаники, конгломераты с растворимым цементом), дезинтеграции сцементированного ими материала с последующим его механическим выносом (суффозией) [10, 12]. Этот термин прочно вошел в отечественное карстоведение и применяется, как и автором, так и всеми исследователями региона для обозначения процессов, сходных с карстовым [1–3, 12, 15–17, 18 и др.].

Несмотря на давно известное наличие кластокарста в рассматриваемом регионе, районы его распространения в общей схеме районирования карста определяются не однозначно. Как самостоятельный тип карста, он получил картографическое отображение лишь в 2005 г. в Атласе Республики Башкортостан [15, с. 60]. В нем содержится мелкомасштабная карта, на которой отражены районы распространения кластокарста на территории РБ и степень пораженности его поверхностными проявлениями.

Распространение кластокарста в общей схеме типизации карста Южного Урала и Предуралья [19] представлено на рис. 1, из которой следует, что кластокарст развит исключительно в карстовой стране Восточно-Европейской равнины и в сравнении с другими типами карста по составу карстующихся пород распространен относительно ограниченно. Наибольшие сплошные площади его развития характерны для северо-востока региона (I-Б) на Приайской равнине. На западе (I-А) он развит локально — на отдельных участках Прибельской равнины, а на остальной территории он не встречается.

Р.Ф. Абдрахманов с соавторами, в статьях в 2021 и 2022 г. [1, с. 107; 2, с. 5] приводят карту распространения карста на территории Южного Урала и Предуралья, на которой без пояснений отображают обширное площадное распространение кластокарста по левобережью рек Дема и Белая на широтах городов Дюртюли — Давлеканово по меридиану г. Белебей. В качестве обоснования авторы ссылаются на карту В.И. Мартина из монографии “Карст Башкортостана” 2002 г. [12, с. 164]. Однако в представленном в монографии виде эта карта отсутствует, а подавляющая часть контуров типов карста на ней и ее оформление

идентичны карте типов карста региона 2020 г. [17, с. 44].

На Приайской равнине кластокарст распространен в западной пологоволнистой ее части к востоку от Уфимского плато с карбонатным типом карста (по меридиану Дуван—Красноуфимск). Развит кластокарст здесь в терригенных отложениях кошелевской свиты иренского горизонта кунгурского яруса нижнего отдела пермской системы.

Кошелевская свита мощностью от 50 на юге до 250 м на севере сложена карбонатизированными и загипсованными песчаниками алевролитами и аргиллитами. Гипсоносные (с гнездами, линзами и прослоями гипса) полимиктовые и хорошо водопроницаемые песчаники занимают почти 50% от общего разреза свиты [24].

Максимальное распространение поверхностных карстопроявлений на площади кошелевской свиты зафиксировано на западной окраине Приайской равнины у подножья восточного склона Уфимского плато в 2–4 км юго-восточнее с. Дуван (между с. Улькунды и д. Пичугино). Представлены они преимущественно чаше- и конусообразными воронками, реже провалами. Поперечники их обычно составляют 5–30, реже 50 м, а глубина колеблется от 2 до 15 м. Нередко встречаются воронки со смежными бортами и карстовые поля (рис. 2), плотность воронок на которых достигает 100 штук на 1 км² [20].

К северу и югу от с. Дуван встречаемость карстовых воронок снижается, что обусловлено уменьшением в целом гипсоносности песчаников. Проявления кластокарста на поверхности встречаются ограниченно и связаны с линзами и прослоями гипса, но с достаточно высокой плотностью. Так, в 10 км к юг-юго-востоку от г. Красноуфимск плотность воронок с поперечником 5–70 м и глубиной до 15 м составляет 40–50 шт./км² [20]. В 30 км к югу от с. Дуван (на Юрюзано-Атавском междуречье) плотность воронок выше и составляет 50–100 шт./км². Воронки здесь большей частью округлые, диаметром 5–50 м и глубиной 3–10 м, чаше- и конусообразные, часть из которых с понорами и обнажениями гипсов [18].

За пределами распространения кошелевской свиты кластокарст на Приайской равнине развит по левобережью р. Ай и связан с загипсованными песчаниками сабанаковской и каранаевской свит кунгурского яруса нижней перми. Гипсоносность этих свит крайне неравномерна, поэтому поверхностные проявления кластокарста сформированы только на отдельных локальных участках. Воронки на них небольших размеров (поперечником до 25 м) и обычно встречаются одиночно. Карстовые поля редки, но плотность воронок на отдельных из них может достигать 110 шт./км².



Рис. 2. Поле кластокарстовых воронок на южной окраине с. Улькунды (Дуванский район РБ) [18].

На Прибельской равнине кластокарст, по данным автора, распространен локально на небольших участках в западной ее части в полосе шириной около 70 км между городами Туймазы и Дюртюли. В.И. Мартин по данным инженерно-геологических изысканий отмечает его развитие также на отдельных участках в г. Уфа [12].

Кластокарст на Прибельской равнине связан с песчано-глинистыми отложениями шешминского горизонта уфимского яруса нижнего отдела пермской системы. Сульфат и карбонат кальция вместе с глинистым цементирующим материалом присутствуют в породах горизонта в виде цемента. По данным государственной геологической съемки масштаба 1:200 000 содержание карбоната кальция в цементе терригенных пород достигает 40%, а сульфата кальция не превышает 10%, но в них содержатся маломощные (не более 3 м), невыдержанные по простиранию прослои и линзы гипса. В.И. Мартин отмечает развитие кластокарста также в породах нижнеказанского подъяруса верхнего отдела пермской системы [12], но исследованиями автора настоящей статьи кластокарстовые формы рельефа в границах развития с поверхности этого стратиграфического подразделения при дешифрировании крупномасштабных аэроснимков и в ходе полевых маршрутов не зафиксированы.

Поверхностные проявления кластокарста на Прибельской равнине однообразны и представлены исключительно блюдце-, реже чашеобразными, небольшими (до 30 м в поперечнике) и неглубокими (очень редко до 3 м) воронками. Встречаются они одиночно и карстовых полей не образуют. Главной особенностью их распространения является то, что они располагаются цепочками длиной не более 5 км параллельно ближайшему эрозионному врезу на речных в основном левобережных верхнеплейстоценовых террасах и отсутствуют на поверхностях рельефа более древнего возраста.

Современная активность развития кластокарста оценена по интенсивности результирующих проявлений карстового процесса на поверхности —

провалов, которая является одним из показателей карстоопасности территории.

На Приайской равнине в загипсованных песчаниках кощелевской свиты с 1952 по 2021 г. достоверно зафиксировано 8 крупных (диаметром до 30 м и глубиной до 32 м) и не менее 10 мелких (поперечником до 5 м и глубиной 3 м) провалов. Большинство их возникло в 2–10 км к юго-востоку от с. Дуван с интенсивностью их образования 0.01 шт./км² в год. Самый крупный провал за это время зафиксирован и обследован автором в ходе изучения ЭГП в апреле 1988 г. в 2.3 км юго-западнее с. Улькунды (в 6 км юго-восточнее с. Дуван). На момент первого обследования входное отверстие провала было округлым диаметром 5 м. В бортах его обнажались элювиально-делювиальные суглинки и глины, под которыми залежали мелкозернистые, тонкослоистые песчаники с листоватыми прослоями известняков. Глубина провала по центру составляла 22 м, а поперечник по дну 10 м. По данным повторного обследования глубина провала к октябрю 1988 г. увеличилась до 32 м (!) [20, 24]. Через 33 года на месте провала, в результате обрушения его бортов, сформировалась округлая конусообразная воронка диаметром 26 м и глубиной 13 м (рис. 3).

Площади распространения кластокарста на Приайской равнине и отрицательное его воздействие на объекты экономики и жизнедеятельность человека соизмеримы с воздействием самого опасного в регионе сульфатного карста.

На Прибельской равнине современные кластокарстовые провалы в естественных условиях в последние 100 лет не фиксировались [17].

Р.Ф. Абдрахманов и др. [3] указывают, что резкая активизация карстово-суффозионного процесса происходит при сооружении прудов и водоемов. Создание водоема на р. Агарды (бассейн р. Кармасан) вызвало растворение прослоев гипса и гипсового цемента в аргиллитоподобных глинах. В результате этого в верхнем бьефе левого склона долины на второй год эксплуатации пруда возникла цепочка воронок диаметром до 2 м и глубиной до 1 м. Считается [3], что образование их свя-



Рис. 3. Улыкундинский провал [24]: а – форма провала в апреле 1988 г., б – конусообразная воронка в июне 2021 г., образовавшаяся на месте провала.

зано с активизацией кластокарста в уфимских терригенных породах. Это единственное известное на сегодня современное активное проявление кластокарста на поверхности на юго-западе региона. В настоящее время водоем эксплуатируется и в последние 30 лет подобных явлений при создании малых водохранилищ на Прибельской равнине вообще не фиксировалось, равно как и образование в Южном Предуралье в последние 100 лет каких-либо новых форм любых проявлений кластокарста.

Таким образом, кластокарст на территории РБ имеет площадной характер распространения только на северо-востоке республики, а на остальной ее части формы его проявления развиты локально. Современная активность его развития как по масштабам проявления, так и по частоте образования его новых форм на Приайской равнине заметно выше, чем на Прибельской.

КАРСТ ИЗВЕСТКОВЫХ ТУФОВ

В районе исследований карст известковых туфов развит преимущественно на Бугульмино-Белебеевской возвышенности и связан с карбонатными породами казанского яруса верхней перми. Выделение его в самостоятельный нетрадиционный тип карста обусловлено своеобразными и крайне редко встречающимися формами его проявления. Главной их особенностью является то, что они представлены не отрицательными формами рельефа (провалами, воронками и т.п.), а покровами карбонатных туфов (травертина) и пещер в них. Покровы известкового туфа сформированы на склонах эрозионной сети высотой 10–50 м и протяженностью до 150–200 м, они образованы осадками родниковых вод [11]. Воды родников, опробованные при гидрогеологических съемках,

у выхода которых зафиксированы покровы известкового туфа, пресные гидрокарбонатного магниево-кальциево-натриевого состава с общей минерализацией 0.3–0.4 г/дм³ при общей жесткости 5.5–5.6 мг-экв/дм³ [11, 25].

Все исследователи связывают образование травертина с дегазацией диоксида углерода при выходе подземных вод на поверхность, а высокое содержание свободного СО₂ в них – с процессами окисления вкраплений пирита в коренных породах [3, 11, 12].

Покровы известкового туфа незначительны по площади и не превышают обычно десятков квадратных метров. Они фиксировались автором в ходе изучения ЭГП у выхода родников в виде травертиновых уступов как в Южном Предуралье, так и в горной части Южного Урала.

Самый крупный травертиновый покров региона площадью около 0.5 км² известен в 3.8 км вверх по тальвегу Казенного лога, устье которого открывается справа в долину р. Кидаш между деревнями Нижнетроицкое и Старошахово (Туймзинский район РБ) [3, 11, 13 и др.]. Источником его является пластовый выход подземных вод из верхнеказанского водоносного горизонта. Он представлен цепочкой нисходящих родников, выходящих из-под обломков известняков в средней части левого склона лога. Родники расщеплены вдоль склона на протяжении 250 м в интервале абсолютных отметок 253–255 м с превышением над тальвегом лога 16–18 м и суммарным дебитом в летний период года около 50 дм³/с.

По результатам ранее проведенных исследований [3, 11] считается, что основной причиной туфообразования в Казенном логу является дегазация диоксида углерода при выходе подземных вод на поверхность под воздействием повышения

температуры. Между тем общеизвестно, что кроме температурного фактора отложению известкового туфа способствуют также падение давления подземных вод, связанное с их выходом на поверхность, диффузия свободного CO_2 в атмосферу из-за более интенсивного движения воды на поверхности и его ассимиляция растениями [25].

Кроме определяющего геохимического условия образования известкового туфа, важную роль в травертиногенезе играет биологический фактор, который ранее при развитии карста известковых туфов в рассматриваемом регионе не учитывался. В настоящее время установлено [22, 23], что отложению известкового туфа способствуют травертин-образующие организмы. Так, склон Казенного лога с максимальной площадью травертина ниже выхода подземных вод покрыт реофильным сообществом зеленых мхов, среди которых встречается и “краснокнижный” в РБ мох – палюстриелла незамеченная (*Palustriella de-*

cipiens) [13]. Именно инкрустированные карбонатом “подушки” мхов образуют пористый губчатый карбонатный осадок, который сохраняет форму мха и фоссилизуется. Пористое моховое слоевище обеспечивает архитектурную основу для отложений травертина [25]. При отсутствии мха осаждение карбоната кальция у выхода родников все равно происходит, но нерастворимый осадок карстующихся пород не сохраняется, а транспортируется проточной водой вниз по течению [25]. То есть отложение известкового туфа возможно не только при наличии гидрогеохимических условий, но и при обязательном участии биоты.

Родниковые воды, стекая по покрову травертина, образуют каскады мелких водопадов (рис. 4). В месте наибольшей его мощности сформировался Шумиловский водопад (рис. 5), который входит в состав комплексного памятника природы (постановление Правительства РБ от 14.12.2010



Рис. 4. Покровы травертина в районе Шумиловского водопада [25].



Рис. 5. Шумиловский водопад [25].

№ 480). Характеристика его приведена в Реестре [13], а условия образования в [25]. Здесь лишь следует подчеркнуть, что главной особенностью водопада является то, что наряду с падением с травертинового уступа мелких ручейков, сток воды с него происходит из мохового слоевища тонкими струйками, что придает водопаду особую привлекательность.

В окрестностях Шумиловского водопада имеются три грота и две небольшие пещеры протяженностью от 3.5 до 13 м. Они находятся в 10–15 м выше подошвы туфового массива. По мнению ряда исследователей [3, 11], они образованы растворением известкового туфа, что маловероятно, поскольку травертин представляет собой трудно растворимый осадок карбонатов. Учитывая важную роль биоты в травертиногенезе, можно предположить, что гроты и пещеры в “Урочище Шумиловский водопад” представляют собой изначально не заполненные травертином пустоты. Сохранению их в массиве известковых туфов способствовали турбулентные потоки воды, препятствующие формированию сообществ травертин-образующих организмов. Подтверждением этому предположению служат: коридорный тип пещер с весьма малыми поперечными сечениями (как правило, менее 1.5 м²), наличие в них проточных озер и фрагментов террас подземных водных потоков, подобных речным террасам. То есть пещеры урочища представляют собой подземные пространства, не заполненные травертином в местах, где в силу больших скоростей подземного водного потока, условия образования известкового туфа с участием биоты отсутствуют. Между тем, гидрохимические условия отложения карбоната кальция обуславливают формирование в пещерах небольших сталактитов.

СУЛЬФИДНЫЙ КАРСТ

В научную литературу термин “рудный карст” впервые был введен Ю.П. Ивенсенем, под которым он понимал “окислительное выщелачивание” сульфидных минералов [7]. На особый литологический тип карста указывал и В.А. Апродов [4], под которым он также понимал процесс выщелачивания природными водами сульфидных рудных тел. В дальнейшем рудный карст стал толковаться далеко неоднозначно [26]. Так, одни исследователи рассматривали рудный карст как карстовые полости любого происхождения, вмещающие руды [9], другие – как пустоты и полости, возникающие в карбонатных породах под действием серной кислоты (продукта окисления сульфидных руд) [14], третьи, вслед за Ю.П. Ивенсенем, – как карстовый процесс, развивающийся непосредственно в сульфидных рудных телах [4, 21].

Наиболее полное обоснование выделения сульфидного карста, как одного из самостоятельных литологических типов карста, было дано, по мнению автора, В.А. Гаряиновым [6]. Развивая представления о рудном карсте Ю.П. Ивенсона, В.А. Апродова и Н.И. Соколова, он определил рудный карст не как явление локализации рудного вещества в ранее образовавшихся карстовых полостях (рудноносный карст по [9] или рудный по [7]), и не как карст в известняках, вмещающих тела сульфидных руд, а как карст в самих рудных телах. При этом он совершенно справедливо использовал термин “сульфидный карст”, который четко обозначает (по аналогии с сульфатным, карбонатным и т.п.) группу карстующихся пород [26]. Этот термин и его толкование В.А. Гаряинова принимаются и автором настоящей работы.

При выщелачивании сульфидов из первичных руд может выноситься до 80–90% их объема, при этом резко увеличивается их пористость и образуются пустоты. Из этого следует, что сульфидные руды по механизму протекания в них карстового процесса практически ничем не отличаются от других традиционных карстующихся пород [6].

Развитие сульфидного карста, как и других его литологических типов (карбонатного и сульфатного), происходит под влиянием хорошо известных общих геолого-геоморфологических и климато-гидрогеологических факторов [10]. При этом, кроме физических и геохимических свойств рудных тел, глубина и интенсивность развития сульфидного карста зависят от состава и свойств вмещающих рудные тела пород. Наибольшее развитие он получил в условиях, когда сульфидные руды находятся среди традиционно карстующихся карбонатных пород, в которых карст под воздействием сульфидных вод заметно активизируется [6].

Распространение сульфидного карста приурочено к зонам сульфидной минерализации и месторождениям медноколчеданных руд. Развита он на локальных участках Башкирского Зауралья (см. рис. 1), где коэффициент увлажнения территории менее 1. В этом отношении сульфидный карст в рассматриваемом регионе развивается в условиях недостаточного увлажнения территории. На поверхности он представлен в основном округлыми блюдцеобразными западинами часто с заболоченным дном, очень редко чашеобразными воронками. Поперечник их колеблется от нескольких до десятков метров, а глубина не превышает 1–2 м [26]. Они были широко развиты на рудном поле Юбилейного месторождения, особенно в районе третьей залежи, выходящей на поверхность палеозойского фундамента под юрскими отложениями. Распространены они также в южной части Западно-Подольского участка сульфидной минерализации, в Маканско-Петропавловской тектонической зоне в бассейне р. Макан

и на Бузавлык-Таналыкском междуречье [14]. Как указывают М.Ш. Биков и Ю.В. Александров (1978 г.), существовали они и на Бурибайском медноколчеданном месторождении.

По мнению В.А. Гаряинова [6], поверхностные проявления сульфидного карста могут служить одним из поисковых признаков новых месторождений меди.

В настоящее время в процессе разработки медноколчеданных месторождений и хозяйственного освоения территорий формы рельефа, обусловленные развитием сульфидного карста, большей частью уничтожены.

ДРУГИЕ НЕТРАДИЦИОННЫЕ ТИПЫ КАРСТА

Кроме рассмотренных выше нетрадиционных типов карста на Южном Урале и в Предуралье развиты также соляной карст и карст в мраморах.

В Башкортостане соляной карст известен в Предуральском краевом прогибе. Он обусловлен искусственным выщелачиванием месторождений поваренной соли в глубоких горизонтах, самое примечательное и известное из которых — Яр-Бишкадакское месторождение в Ишимбайском районе РБ (паспорт месторождения Росгеолфонда № Б-18775). С 1950-х гг. в отложениях кунгурского яруса нижней перми эксплуатируется правобережный участок этого месторождения [8] с целью добычи поваренной соли для производства кальцинированной соды АК “Сода” (лицензия УФА00116ТЭ). Мощность искусственно растворяемых соленосных пластов путем закачки в них пресных вод на глубине 840–1350 м составляет 190–380 м. Выщелачиванием создаются подземные резервуары объемом до 4 тыс. м³, над которыми по данным Г.В. Бельтюкова происходит проседание земной поверхности со скоростью 10 мм/год [5]. К сожалению, современные сведения о влиянии разработки Яр-Бишкадакского месторождения поваренной соли на состояние недр отсутствуют.

Небезынтересно отметить, что созданные подземным выщелачиванием пустоты на Яр-Бишкадакском месторождении используются как подземные хранилища нефтепродуктов (ОАО “Подземнефтегаз”, лицензия УФА00688ПП). В бывшем СССР это первое подземное хранилище нефтепродуктов, которое эксплуатируется с 1960 г.

Карст в мраморах по сути своей является карбонатным карстом, поскольку мрамор — это перекристаллизованный известняк, но на территории РБ он встречается крайне редко. Так, на государственном балансе запасов в настоящее время числится всего 6 месторождений мраморизованных известняков, из которых только одно — Амангильдинское, является месторождением мрамора

девонского возраста (паспорт месторождения Росгеолфонда № Б-25989).

В 2000 г. на дне Амангильдинского карьера (Абзелиловский район РБ) автором и Ю.В. Соколовым была обследована подземная полость объемом 103 м³, которая была вскрыта на дне карьера при блочной добыче мрамора (рис. 6). В результате образования провала на дне карьера разработка месторождения была приостановлена на несколько месяцев.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из выделенных нетрадиционных типов карста на Южном Урале и в Предуралье наибольшее развитие получил кластокарст. Поверхностные его проявления имеют площадное, но ограниченное распространение только в северно-восточной части региона, а на остальной территории он развит локально. Формы проявления других нетрадици-

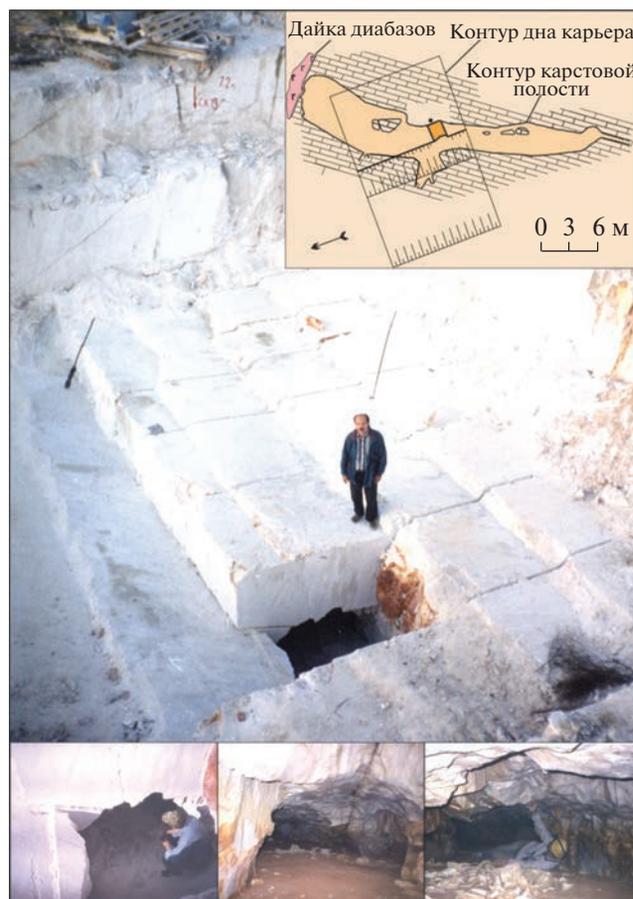


Рис. 6. Провал над карстовой полостью в Амангильдинском карьере при блочной разработке мрамора. В верхнем правом углу — план полости; в нижнем ряду (фото слева направо): вход в карстовую полость, северо-восточная и южная части полости (А.И. Смирнов и Ю.В. Соколов, сентябрь, 2000 г.).

онных типов карста на рассматриваемой территории встречаются крайне редко.

Нетрадиционные типы карста региона имеют как отрицательное, так и положительное научно-практическое значение.

Кластокарст и карст в мраморах, как и традиционные типы карста, осложняют хозяйственное освоение территории. Первый – ухудшает инженерно-геологические условия строительства и повышает карстоопасность территории; второй – осложняет разработку месторождений полезных ископаемых. В то же время поверхностные проявления сульфидного карста являются поисковым признаком медноколчеданных руд. Соляной карст способствует добыче поваренной соли в регионе, а созданные при этом карстовые пустоты используются в качестве подземных хранилищ нефтепродуктов.

Особое положение занимает карст известковых туфов, обуславливающий формирование своеобразных карстовых форм, уникальным из которых является Шумиловский водопад – памятник природы республиканского значения. Он ежегодно привлекает к себе внимание тысячи, к сожалению, пока неорганизованных туристов.

Дальнейшее изучение нетрадиционных типов карста должно быть направлено на оценку современной активности их развития с целью определения степени воздействия редких типов карста на состояния недр (прежде всего соляного и кластокарста), организацию экскурсионных научных и учебно-познавательных маршрутов в районах проявления карста известковых туфов и кластокарста.

Работа выполнена в рамках государственной бюджетной темы № FMRS-2022-0010.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абдрахманов Р.Ф., Дурнаева В.Н., Полева А.О., Бакиева А.Р.* Оценка современной активности карбонатного карста с установлением геолого-гидрогеологических особенностей его развития в неоген-четвертичное время // Геологический вестник. 2021. № 1. С. 105–114.
2. *Абдрахманов Р.Ф., Полева А.О., Дурнаева В.Н., Бакиева А.Р., Еранов Е.А., Носарева С.П.* Карст Южного Урала и Предуралья, современная активность его развития // Геологический вестник. 2022. № 1. С. 3–22.
3. *Абдрахманов Р.Ф., Мартин В.И., Попов В.Г., Рожественский А.П., Смирнов А.И., Травкин А.И.* Карст Башкортостана. Уфа: Информреклама, 2002. 384 с.
4. *Апродов В.А.* Рудный карст // Общие вопросы карстоведения / Отв. ред.: Н.А. Гвоздецкий, Н.И. Соколов. М: Изд-во АН СССР, 1962. С. 116–129.
5. *Бельтюков Г.В.* Соляной карст Башкирского Предуралья и его практическое значение // Карст Башкирии: тез. докл. к Совещ. по вопросам науч. и практ. значения карста Башкирии. Уфа: [б.и.], 1971. С. 26–27.
6. *Гаряинов В.А.* Экзогенные структуры и их поисковое значение. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1980. 208 с.
7. *Ежов Ю.А., Лысенин Г.П., Андрейчук В.Н., Дублянский Ю.В.* Карст в земной коре: распространение и основные типы. Новосибирск: ОИГГМ, 1992. 76 с.
8. *Каратыгин Е.П., Старостенков В.Л.* Развитие геотехнологических методов при разработке Яр-Биш-кадакского месторождения каменной соли // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2003. № 6. С. 197–200.
9. *Ляхницкий Ю.С.* Вопросы терминологии и классификации карстовых явлений // Проблемы изучения, экологии и охраны пещер. Киев:[б.и.], 1987. С. 13–23.
10. *Максимович Г.А.* Основы карстоведения. Пермь: Пермское книжное издательство, 1963. Т. 1. 444 с.
11. *Максимович Г.А., Попов В.Г., Абдрахманов Р.Ф., Костарев В.П.* Условия формирования и карстовые пещеры известковых туфов Западной Башкирии // Пещеры. Пермь: ПГУ, 1976. Вып. 16. С. 88–96.
12. *Мартин В.И.* Типы и районирование карста Башкортостана // Карст Башкортостана. Уфа: РА Информреклама, 2002. С. 133–176.
13. *Мулдашев А.А.* Урочище Шумиловский водопад. Изд. 4-е. перераб. // Реестр ООПТ республиканского значения (Республики Башкортостан). 2022. С. 303–304.
14. *Николаев Н.И.* Основные проблемы изучения карста // Общие вопросы карстоведения. М.: Изд-во АН СССР, 1962. С. 26–33.
15. *Смирнов А.И.* Карст // Атлас Республики Башкортостан / Гл. ред. И.М. Япаров. Уфа: Омская картогр. ф-ка, Роскартография, 2005. С. 60.
16. *Смирнов А.И.* Равнинный карст Башкирского Зауралья и его практическое значение // Вестник Академии наук Республики Башкортостан. 2019. Т. 32. № 3 (95). С. 25–33.
17. *Смирнов А.И.* Современные карстовые провалы на территории Южного Урала и Предуралья (в границах Республики Башкортостан) // Инженерная геология. 2020. Т. XV. № 4. С. 42–53.
18. *Смирнов А.И.* Карст территории геопарка “Янган-тау” // Геологический вестник. 2021. № 3. С. 37–51.
19. *Смирнов А.И.* Виды и современная активность развития опасных геологических процессов на Южном Урале и в Предуралье // Геоэкология. 2022. № 2. С. 33–47.
20. *Смирнов А.И., Абдрахманов Р.Ф.* Карст Приайской равнины в Южном Предуралье // Геология, полезные ископаемые и проблемы геоэкологии Башкортостана, Урала и сопредельных территорий: матер. XXII Межрегион. научно-практ. конф. 2018. С. 406–411.
21. *Соколов Н.И.* Типологическая классификация карста // Материалы Комиссии по изучению геологии и географии карста. М.: [б.и.], 1961 № 1. С. 140–153.

22. *Golubic S., Violante C., Plenkovic-Moraj A., Grgasovic T.* Travertines and calcareous tufa deposits: an insight into diagenesis // *Geologia Croatica*. 61 (2). 2008. P. 363–378.
<https://doi.org/10.4154/GC.2008.28>
23. *Pentecost A.* Review and Reassessment of Travertine Classification // *Géographie physique et Quaternaire*. 2005. V. 48. № 3. P. 305–314.
24. *Smirnov A.I.* Clastokarst of the southern Cis-Urals // Proc. Int. Conf. “Science and innovations 2021: development directions and priorities” (September 29, 2021. Melbourne, Australia). Auspublishers, 2021. P. 179–187.
25. *Smirnov A.I.* Shumilovsky falls - unique karst object of the Southern Cis-Urals // Proc. of the Int. University Scientific Forum “Practice Oriented Science: UAE – RUSSIA – INDIA”. Scientific publishing house Infinity, 2022. P. 166–172.
26. *Smirnov A.I.* Sulfide karst of the Southern Urals // Scientific research of the SCO countries: synergy and integration: Proc. of the Int. Conf., Beijing, 20 april 2022. Beijing, Scientific publishing house Infinity, 2022. P. 168–174.

NON-TRADITIONAL KARST TYPES IN THE SOUTHERN URALS AND CISURALS

A. I. Smirnov

*Institute of Geology, Ufa Federal Research Centre, Russian Academy of Sciences,
Karl Marks st., 16/2, Ufa, 450077 Russia*

E-mail: smalil@mail.ru

Despite the wide distribution of sulfate and carbonate karst in the study area, the nontraditional, rarely encountered karst types are also registered. These are clastokarst, karst of calcareous tuffs, sulfide karst, salt karst and marble karst. For each of these nontraditional types of karst, the conditions and factors of development were determined according to the karstic rock composition. Calcareous tuff karst is the least common in the study area, meanwhile clastokarst is widespread. Calcareous tuff karst is spread in the westernmost part of the Southern CisUrals, in the eastern outskirts of the Volga-Ural anticline; and clastokarst is found in the western margin of the Yuryuzan-Sylva depression of the CisUrals marginal foredeep. Sulfide karst is developed in the plains of the Southern TransUrals within the Magnitogorsk megazone of the Ural folded system, and salt karst occurs in the flat foothills of the Southern Urals within the Belaya Megadepression and the Shikhan-Ishimbai saddle of the CisUrals marginal foredeep. It has been established that the previously identified areas of clastokarst distribution in the west of the area under consideration are not confirmed by modern and Pleistocene forms of its manifestation. The negative impact of clastokarst on economic facilities and humans is comparable to the impact of the most common and dangerous sulfate karst, and this must be taken into account when designing and constructing new buildings and engineering structures. Salt karst is manifested in artificial leaching of rock salt at a depth, such salt is necessary for the production of soda ash (JSC “Soda”); the formed voids are used as underground storage facilities for oil products (OJSC Podzemneftegaz). Calcareous tuff karst is a rare type of karst in the region under consideration, it can be observed at the complex natural monument “Shumilovsky waterfall”. Surface manifestations of sulfide karst can be a search feature of new copper-sulfide deposits. Non-traditional types of karst have both positive and negative practical implications. Karst in marble complicates the development of mineral deposits, and clastokarst complicates the economic development of the territory. Calcareous tuff karst creates unique local landforms, and sulfide karst is of practical importance in the search for new mineral deposits. On the one hand, salt karst determines the extraction of minerals deposits and contributes to the creation of useful underground storage facilities, on the other hand, it destroys them.

Keywords: *clastokarst, calcareous tuff karst, sulfide karst, salt karst, Republic of Bashkortostan*

REFERENCES

1. *Abdrakhmanov, R.F., Durnaeva, V.N., Poleva, A.O., Bakieva, A.R.* *Otsenka sovremennoi aktivnosti karbonatnogo karsta s ustanovleniem geologo-gidrogeologicheskikh osobennostei ego razvitiya v neogen-chetvertichnoe vremya* [Assessment of present-day activity of carbonate karst and determination of geological and hydrogeological features of its development in Neogene and Quaternary age]. *Geologicheskii vestnik*, 2021, no. 1, pp. 105–114. (in Russian)
2. *Abdrakhmanov, R.F., Poleva, A.O., Durnaeva, V.N., Bakieva, A.R., Eranov, E.A., Nosareva, S.P.* *Karst Yuzhnogo Urala i Predural'ya, sovremennaya aktivnost' ego razvitiya* [Karst in the Southern Urals and CisUrals, its present-day development activity]. *Geologicheskii vestnik*, 2022, no. 1, pp. 3–22. (in Russian)
3. *Abdrakhmanov, R.F., Martin, V.I., Popov, V.G., Rozhdestvenskii, A.I., Smirnov, A.I., Travkin, A.I.* *Karst Bashkortostana* [Karst in Bashkortostan]. Ufa, Informreklama Publ., 2002, 384 p. (in Russian)
4. *Aprodov, V.A.* Rudnyi karst [Karst in ores]. In: *Obshchie voprosy karstovedeniya* [Fundamental issues in karst

- study]. N.A. Gvozdetkii, N.I. Sokolov, Eds. Moscow, AN SSSR Publ., 1962, pp. 116–129. (in Russian)
5. Bel'tyukov, G.V. *Solyanoi karst Bashkirskogo Predural'ya i ego prakticheskoe znachenie* [Salt karst in Bashkiriya CisUrals and its practical significance]. In: *Karst Bashkirii: Mater. respub. Soveshch.* [Karst in Bashkiriya. Proc. Sci.-Techn.Workshop]. Ufa, 1971, pp. 26–27. (in Russian)
 6. Garyainov, V.A. *Ekzogennye struktury i ikh poiskovoe znachenie* [Exogenic structures and their survey role]. Saratov, Saratov University Publ., 1980, 208 p. (in Russian)
 7. Ezhov, Yu.A., Lysenin, G.P., Andreichuk, V.N., Dublyanskii, Yu.V. *Karst v zemnoi kore: rasprostranenie i osnovnye tipy* [Karst in the Earth crust: distribution and the main types]. Novosibirsk, 1992, 76 p. (in Russian)
 8. Karatygin, E.P., Starostenkov, V.L. *Razvitie geotekhnologicheskikh metodov pri razrabotke Yar-Bishkadakskogo mestorozhdeniya kamennoi soli* [Geotechnological methods in the development of Yar-Bishkadakskoe rock salt deposit]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*, 2003, no. 6, pp. 197–200. (in Russian)
 9. Lyakhnitskii, Yu.S. *Voprosy terminologii i klassifikatsii karstovykh yavlenii* [Issues in terminology and classification of karst phenomena]. In: *Problemy izucheniya, ekologii i okhrany peshcher* [Issues of the study, ecology, and preservation of caves]. Kiev, 1987, pp. 13–23. (in Russian)
 10. Maksimovich, G.A. *Osnovy karstovedeniya* [Fundamental of karstology]. Perm', Permskoe knizhnoe izd-vo, 1963, vol. 1, 444 p. (in Russian)
 11. Maksimovich, G.A., Popov, V.G., Abdrakhmanov, R.F., Kostarev, V.P. *Usloviya formirovaniya i karstovye peshchery izvestkovykh tufov Zapadnoi Bashkirii* [Formation conditions and karstic caves in limestone tuffs in the Western Bashkiriya]. In: *Peshchery* [Caves]. Perm', PGU Publ. 1976, issue 16, pp. 88–96. (in Russian)
 12. Martin, V.I. *Tipy i rayonirovanie karsta Bashkortostana* [Types and zoning of karst in Bashkortostan]. In: *Karst Bashkortostana* [Karst in Bashkortostan]. Ufa, Informreklama Publ., 2002, pp. 216–226. (in Russian)
 13. Muldashev, A.A. *Urochishche Shumilovskii vodopad* [Shumilovskii waterfall tract]. *Reestr OOPT respublikanskogo znacheniya (Respubliki Bashkortostan)* [Register of specially protected natural areas in Bashkortostan Republic]. 2022, pp. 303–304. (in Russian)
 14. Nikolaev, N.I. *Osnovnye problemy izucheniya karsta* [The main problems in the karst study]. In: *Obshchie voprosy karstovedeniya* [Fundamental issues in karst study]. N.A. Gvozdetkii, N.I. Sokolov, Eds. Moscow, AN SSSR Publ., 1962, pp. 26–33. (in Russian)
 15. Smirnov, A.I. *Karst. Atlas Respubliki Bashkortostan* [Karst. Atlas of Bashkortostan Republic]. I.M. Yarov, Ed. Ufa, Roskartografiya Publ., 2005, 60 p. (in Russian)
 16. Smirnov, A.I. *Ravninnyi karst Bashkirskogo Zaural'ya i ego prakticheskoe znachenie* [Plain karst in Bashkiriya CisUrals and its practical importance]. *Vestnik Akademii nauk Respubliki Bashkortostan*, 2019, vol. 32, no. (95), pp. 25–33. (in Russian)
 17. Smirnov, A.I. *Sovremennye karstovye provaly na territorii Yuzhnogo Urala i Predural'ya (v granitsakh Respubliki Bashkortostan)* [Modern karst collapses in Southern Urals and CisUrals (within the boundaries of Bashkortostan Republic)]. *Inzhenernaya geologiya*, 2020, vol. XV, no. 4, pp. 42–53. (in Russian)
 18. Smirnov, A.I. *Karst territorii geoparka "Yangan-tau"* [Karst in Yangan-tau geopark]. *Geologicheskii vestnik*, 2021, no. 3, pp. 37–51. (in Russian)
 19. Smirnov, A.I. *Vidy i sovremennaya aktivnost' razvitiya opasnykh geologicheskikh protsessov na Yuzhnom Urale i v Predural'e* [Types and modern activity of hazardous geological processes in the Southern Urals and CisUrals]. *Geoekologiya*, 2022, no. 2, pp. 33–47. (in Russian)
 20. Smirnov, A.I., Abdrakhmanov, R.F. *Karst Priaiskoi ravniny v Yuzhnom Predural'e* [Karst in Priaiskaya Plain, the southern CisUrals]. In: *Geologiya, poleznye iskopaemye i problemy geoekologii Bashkortostana, Urala i sopredel'nykh territorii. Materialy 12i Mezhtsevnogo nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Geology, mineral deposits, and geoeological problems in Bashkortostan, Urals and adjacent areas. Proc. 12th Interregional Sci.-Pract. Conf.]. 2018. pp. 406–411. (in Russian)
 21. Sokolov, N.I. *Tipologicheskaya klassifikatsiya karsta* [Typological classification of karst]. *Mat-ly Komiss. po izucheniju geologii i geografii karsta* [Proc. of Commission on the study of karst geology and geography]. Moscow, 1961, no. 1. pp. 140–153. (in Russian)
 22. Golubic, S., Violante, C., Plenkovic-Moraj, A. Grgasovic, T. *Travertines and calcareous tufa deposits: an insight into diagenesis*. *Geologia Croatica*, 2008, no. 61/2–3. pp. 363–378.
 23. Pentecost, A. *Review and reassessment of travertine classification*. *Géographie physique et Quaternaire*, 2005, vol. 48, no. 3, pp. 305–314.
 24. Smirnov, A.I. *Clastocarst of the southern Cis-Urals*. International Conference "Science and innovations 2021: development directions and priorities". September 29, 2021, pp. 179–187.
 25. Smirnov, A.I. *Shumilovsky falls - unique karst object of the Southern cis-Urals*. In: *Practice Oriented Science: UAE - Russia - India: Materials of International University Scientific Forum, UAE, 09 July 2022*.
 26. Smirnov, A.I. *Sulfide karst of the Southern Urals*. In: *Scientific research of the SCO countries: synergy and integration: Proc. International Conference, Beijing, 20 April 2022*, pp. 168–174.

ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

УДК 551.435.7:624.139.2

**АНАЛИЗ МЕХАНИЗМА ОБРАЗОВАНИЯ ПРОВАЛОВ
В МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОДАХ НА УЧАСТКЕ РАЗВИТИЯ
МЕЖМЕРЗЛОТНЫХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД С ПОЗИЦИЙ ФОРМИРОВАНИЯ
ДИССИПАТИВНЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СТРУКТУР**

© 2023 г. Г. П. Постоев^{1,*}, Л. А. Гагарин^{2,**}, А. И. Казеев^{1,***},
М. М. Кучуков^{1,****}, Н. А. Павлова²

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

²Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН,
ул. Мерзлотная, 36, Якутск, Республика Саха (Якутия), 677010 Россия

*E-mail: postoev.german@yandex.ru

**E-mail: gagarinla@gmail.com

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

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

Поступила в редакцию 28.02.2023 г.

После доработки 30.03.2023 г.

Принята к публикации 03.05.2023 г.

Рассматриваются опасные проявления на земной поверхности в виде провалов на территории Центральной Якутии в пределах надпойменной террасы р. Лена, на участках развития межмерзлотных подземных вод. Анализируются материалы мониторинга и геофизических работ на участках проявления провалов. Исследуются возможные механизмы образования провалов в результате развития термосуффозии и образования диссипативных геологических структур.

Ключевые слова: многолетнемерзлые породы, провал, подземная полость, термосуффозия, талик, диссипативные геологические структуры (ДГС), межмерзлотные подземные воды, параметры провала

DOI: 10.31857/S0869780923030098, EDN: WNESKD

ВВЕДЕНИЕ

Образование провалов земной поверхности на территории распространения многолетнемерзлых пород (ММП) – нередкие события. Хорошо известны и широко распространены термокарстовые провалы, которые возникают в сезонноталом слое при оттаивании ММП. В последнее время повышенное внимание уделяется исследованиям более глубоких провалов, особенно после обнаружения так называемого “Ямальского кратера”; чаще всего причины подобных проявлений увязываются с газовыми выбросами. Образование провалов и воронок на участках развития межмерзлотных подземных вод в основном представляют следствием протекания термосуффозионных процессов [1–4]. Подземные воды оказывают механическое и тепловое воздействие на вышележащие мерзлые горные породы, размывают их и образуют пустоты (полости) в песчаном массиве. С течением времени происходит локальное обрушение кровли полости, а на дневной поверхности массива образуется провал. Несмотря на специ-

фику развития криогенных процессов, в подготовке и проявлении провалов в области криолитозоны намечается связь с подобными явлениями и на территориях распространения карстующихся пород и горных выработок [8]. Ряд специалистов также увязывают возникновение провалов в подземные полости с суффозионными процессами [8].

В соответствии с новым направлением исследований, подготовка провала над подземной полостью обуславливается образованием в вышележащей над ней толще пород диссипативных геологических структур (ДГС), которые рассматриваются как проявление защитной реакции геологической среды от изменения исходного напряженно-деформированного состояния (НДС) и распространения разрушительных деформаций в массиве. Именно ДГС локализует зону разрушительных деформаций и определяет границы формируемого явления, в частности провала. Установлено, что формирование ДГС в массиве регламентирует образование нового блока на оползневом участке, подготовку



Рис. 1. Аэрофотоснимок цирка “А” в долине руч. Улахан-Тарын.

предельного состояния и деформирование грунтового основания в виде выпора из-под подошвы фундамента, тем самым подтверждая универсальность выявленных геологических закономерностей [6, 7].

Цель настоящей работы – рассмотрение возможности применения нового подхода с учетом образования ДГС для выявления и расчета параметров провала в ММП над межмерзлотным водоносным таликом на примере участка Улахан-Тарын в Центральной Якутии.

ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЙ

Участок расположен на IV надпойменной (бестяхской) террасе р. Лена, с абсолютными отметками ее поверхности 120–150 м. Рельеф террасы сглаженный. Долины мелких притоков р. Лена и распадки образуют углубления до 10–30 м. Глубина вреза руч. Улахан-Тарын достигает 30 м. Провальные образования на поверхности террасы (диаметром от первых метров до 30 м и глубиной от 1–2 м до 15 м) наблюдаются в области разгрузки подземных вод, приуроченной к нижнему течению ручья. Аллювиальные отложения террасы представлены средне- и мелкозернистыми песками мощностью до 90 м с гравийно-галечниковым слоем в основании. Мощность ММП на участке исследований достигает 420 м.

В четвертичных отложениях и в верхней части подстилающих их коренных пород развиты надмерзлотные и межмерзлотные талики. Подошва

последних залегает на глубине 50 и более метров. Питание родников, приуроченных к долине руч. Улахан-Тарын, осуществляется через сеть подозерных и субаэральных надмерзлотных таликов, расположенных на расстоянии до 25 км. Транзит подземных вод происходит по межмерзлотным таликовым зонам. Воды эти напорные, имеющие уровень до 8–9 м от поверхности земли при залегании кровли межмерзлотного горизонта в среднем на глубине 27–30 м. В местах разгрузки подземных вод образуются врезанные в поверхность бестяхской террасы “цирки” (рис. 1), куда происходит вынос песчаного материала. Зимой в долине руч. Улахан-Тарын образуется наледь¹ длиной до 5 км при средней толщине льда 1.5–2.0 м.

МЕХАНИЗМ ОБРАЗОВАНИЯ ПРОВАЛА В РЕЗУЛЬТАТЕ ТЕРМОСУФФОЗИОННОГО ПРОЦЕССА

Под термосуффозией понимается оттаивание дисперсных ММП под воздействием тепла фильтрующегося подземного потока, их последующее гидромеханическое разрушение и вынос [3, 9]. В результате процессов термосуффозии изменяется положение кровли межмерзлотного водоносного горизонта, уменьшается мощность перекрывающего его криогенного водоупора и формируются локальные ответвления талика вверх к участкам возможного образования провалов земной поверхности.

¹ Улахан-Тарын или Большая Момская наледь – крупнейшая речная наледь мира, находится на р. Мома.

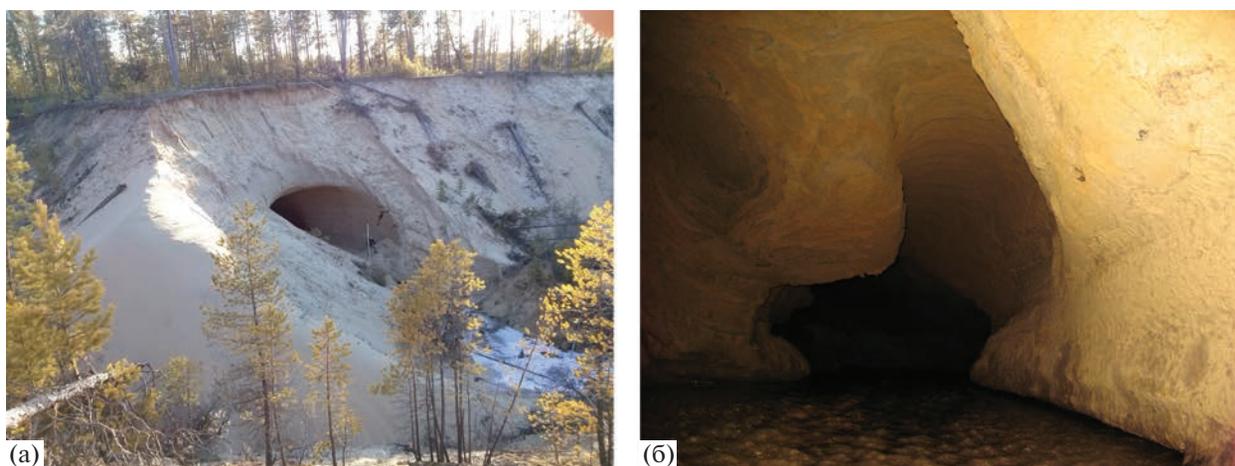


Рис. 2. Пещеры в склоне бестяхской террасы р. Лена в долине руч. Улахан-Тарын, образуемые в результате действия термосуффозионных процессов: а – вид с поверхности, б – вид изнутри.



Рис. 3. Провал термосуффозионного происхождения в долине руч. Улахан-Тарын.

Развитию термосуффозии способствуют: значительный градиент напора межмерзлотных подземных вод в области их разгрузки, достигающий величины 1.1; увеличение пористости пород за счет теплового и механического воздействия подземных вод и вынос песчаных частиц. В результате в песчаном массиве образуются полости и пещеры (рис. 2), в которых происходит резкая смена напорных условий фильтрации подземных вод *межмерзлотного водоносного горизонта* (ММВГ) на безнапорные.

Многолетнее развитие термосуффозии приводит к увеличению размеров образуемых полостей/пещер. Под действием напорных вод ММВГ и геостатического давления происходит локальное обрушение кровли полости при достижении критического соотношения между ее шириной и высотой, а на дневной поверхности образуется провал или воронка [1]. Со временем отдельные

термосуффозионные воронки могут объединяться в линейно вытянутую депрессию (рис. 3). Конечной стадией развития подобных процессов является формирование единого циркообразного оврага (рис. 1, 4).

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ОБРАЗОВАНИЯ ПРОВАЛОВ ПО МЕХАНИЗМУ ФОРМИРОВАНИЯ ДИССИПАТИВНЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СТРУКТУР

Характеристика механизма образования провала с учетом формирования над подземной полостью диссипативных геологических структур (ДГС) представлена в работах [5–7]. Если подземная полость, образовавшаяся в прочных грунтах (карстующихся скальных, ММП и т.п.), имеет “окно” (выход) к покровной толще, представленной, в частности тальми песчано-глинистыми



Рис. 4. Цирк “Е”, заполненный наледным льдом в долине руч. Улахан-Тарын.

грунтами, то указанный механизм может выглядеть следующим образом. Над полостью начинаются разгрузка напряжений и деформации грунта. Депрессионная воронка над полостью формируется вследствие взаимодействия точек массива в покровной толще, снижения давления распора в точке, и, соответственно, проявления горизонтальных и вертикальных деформаций в зависимости от степени близости точки к месту образования подземной полости (рис. 5).

Диаметр возможного провала определяется из уравнения предельного равновесия между возникшими новыми структурами в покровной тол-

ще над полостью: сводом (4) и цилиндрической структурой-столбом (5) (см. рис. 5) [5]:

$$\gamma Z_a - \sigma_{str} = \pi^2 \gamma R / 4, \quad (1)$$

где γ – среднее значение удельного веса грунтов в толще в пределах глубины Z_a ; Z_a – глубина до кровли полости; σ_{str} – структурная прочность грунта на глубине Z_a ; R – (предельный) радиус свода над отверстием в полость при исходных значениях γ , Z_a и σ_{str} .

Отсюда определяется (предельно возможный) радиус провала:

$$R = 4(Z_a - \sigma_{str} / \gamma) / \pi^2. \quad (2)$$

В соответствии с уравнением (1) выявляется диаметр возможного цилиндрического образования над полостью. Установлено, что толщина h оболочки свода и цилиндрической поверхности столба составляет $h = 0.009R$ [5–7]. В грунтах оболочки новой замкнутой структуры (при сохранении условий компрессионного сжатия) формируются напряжения, на два порядка превышающие значение распорного давления в точке массива. Изменение НДС в грунтах оболочки, главным образом, в пограничном слое над полостью, регламентирует изменение устойчивости создавшейся ДГС и характер разрушительных деформаций при образовании провала.

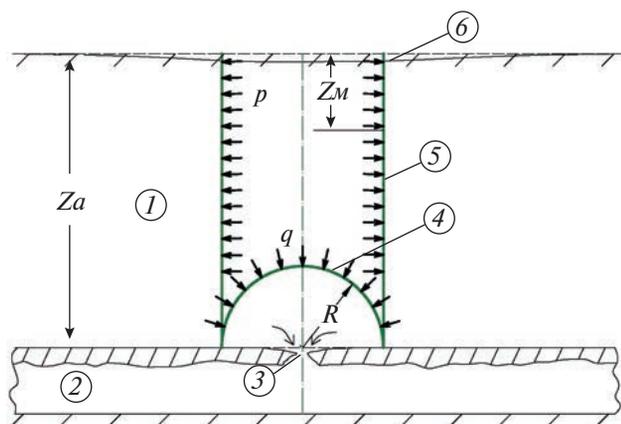


Рис. 5. Схема распределения напряжений в массиве над подземной полостью. 1 – покровная толща над полостью; 2 – пещера/полость; 3 – участок деформирования кровли пещеры и подготовки провала; 4–5 – элементы ДГС (в напряжениях): 4 – свод, 5 – столб; 6 – поверхность массива на участке подготовки провала; p и q – давление грунта на граничные поверхности (оболочки) ДГС радиусом R ; M – произвольная точка в грунтах ДГС, где давление $p = (\gamma Z_M - \sigma_{str,M}) \operatorname{tg}^2(45 - \varphi_M/2)$.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ОБРАЗОВАНИЯ ПРОВАЛОВ В ММП НА УЧАСТКЕ УЛАХАН-ТАРЫН

Изучение провалов проводилось по материалам многолетних исследований Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН процессов термосуффозии и провалообразования на участке Улахан-Тарын, расположенном в долине

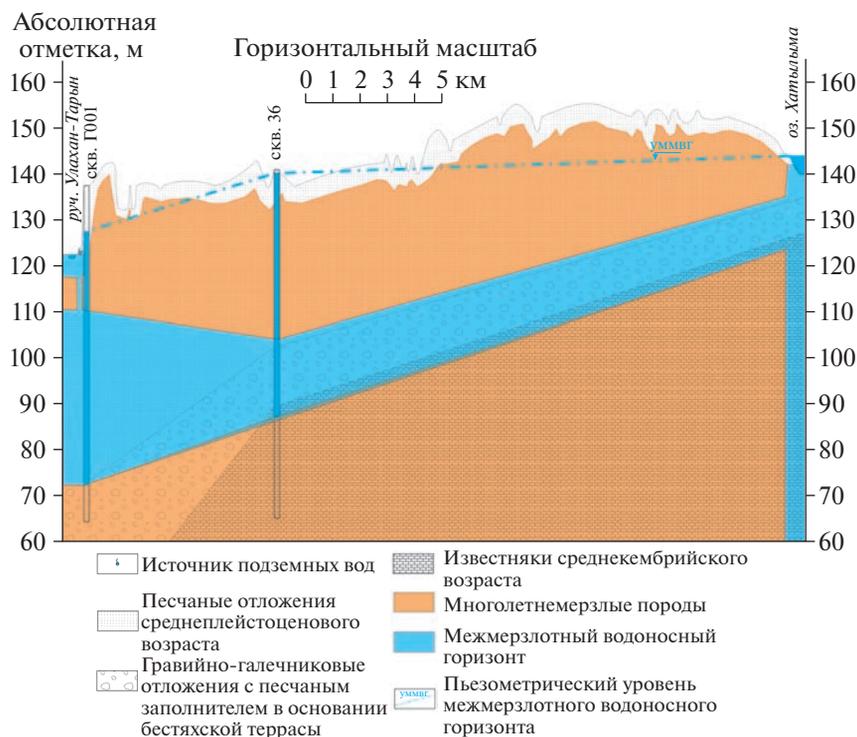


Рис. 6. Схематический мерзлотно-гидрогеологический разрез по линии между оз. Хаталыма и руч. Улахан-Тарын (скв. Г001) [3]. Голубым цветом выделен межмерзлотный водоносный горизонт (ММВГ).

руч. Улахан-Тарын в Центральной Якутии [1–4]. Выполнен комплекс геофизических исследований, включая электротомографию и георадиолокацию, с построением и анализом соответствующих электроразведочных и радиолокационных разрезов.

Установлено, что на исследуемом участке развит межмерзлотный талик, в котором происходит движение напорных подземных вод, которые разгружаются в долине руч. Улахан-Тарын.

В работе [3] исследовано развитие межмерзлотного водоносного горизонта (ММВГ) в толще ММП мощностью до 50 м, представленной песками аллювиальных отложений террасы р. Лена (рис. 6).

Древние покрытые растительностью термосуффозионные воронки и молодые провальные формы рельефа (с крутыми стенками, вплоть до вертикальных) разных диаметров выявлены в области разгрузки межмерзлотных вод, как в непосредственной близости к бровке террасы, так и на значительном удалении от нее (до 350 м).

Так, в марте 2009 г. в 30 м от бровки цирка “Е” (см. рис. 4) авторами работы [3] был обнаружен провал цилиндрической формы диаметром 2 м и глубиной около 5 м. На его вертикальных стенках имелись трещины, в верхней части обнажения песок находился в сыпучемерзлом состоянии, а

на дневной поверхности у провала наблюдалось понижение, с наклоном деревьев к осевой части. В последующие годы при активизации термосуффозионных процессов происходило образование провалов, как на выровненной поверхности террасы, так и в ранее сформировавшихся воронках [3]. По контуру провальных форм (воронки) наблюдались трещины отрыва. На дне отдельных воронок летом отмечалось скопление воды, по химическому составу аналогичной водам надмерзлотного стока.

Геофизические исследования методом электротомографии и георадиолокации позволили получить новые данные о развитии термосуффозии и подготовке провалов земной поверхности (рис. 7, 8) [2, 4].

Установлено, что в местах существующих воронок в геоэлектрическом разрезе отмечаются пониженные значения удельного электрического сопротивления ($VЭС$) пород, свидетельствующие о наличии талика, который имеет “ответвления” (рукава) вверх к воронкам 1 и 2 от кровли ММВГ.

Согласно работе [2], внутри ММВГ выделяются протяженные зоны аномально пониженных значений электрического сопротивления, которые интерпретируются как зоны повышенной пористости пород, каналы фильтрации подземных вод, возможно подобные пещерам (см. рис. 8). Отмечается, что над указанными выявленными

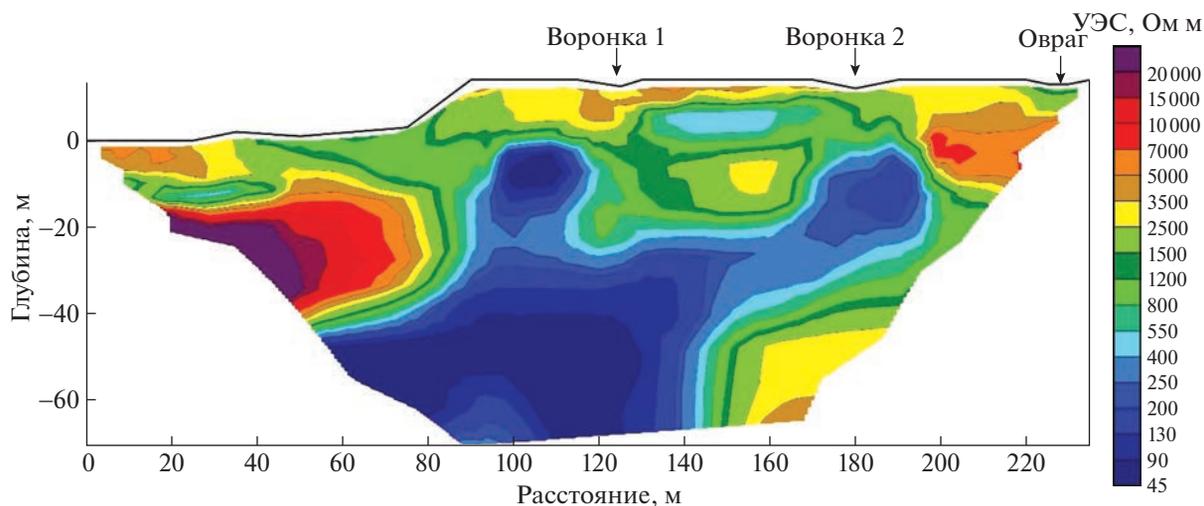


Рис. 7. Геоэлектрический разрез по профилю 1 с показом распределения величин удельного электрического сопротивления пород (УЭС) по работе [4].

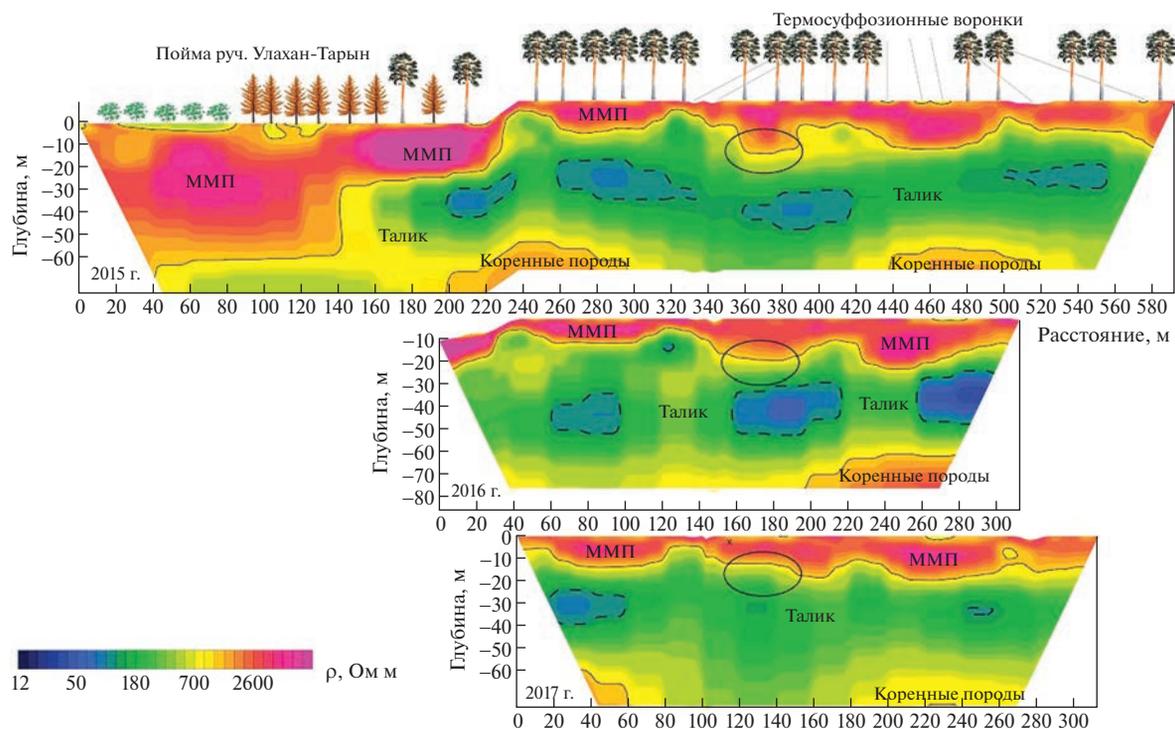


Рис. 8. Геоэлектрический разрез по профилю 6 с результатами исследований в 2015–2017 гг. [2].

зонами проявляется наибольшее количество провалов. Анализ геофизических разрезов показал, что в результате действия напорной фильтрации подземных вод происходит деградация верхнего криогенного водоупора. За 4 года мощность ММП уменьшилась на 4 м. В верхней части разреза выявлены надмерзлотные субэаральные талики, подошва которых может достигать глубины 10 м.

АНАЛИЗ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

При принятии гипотезы о подготовке и образовании провала вследствие развития термосульфидии и динамики талика, тем не менее, затруднено выявление механизма изменения НДС грунтов на участке провала: нет определенности в индикации действительной структурной прочно-

сти грунтов в кровле полости, условий снижения давления (напряжений в точках) и деформирования грунтов.

Размыв и разрушение кровли ММП происходит под действием критической величины гидравлического градиента и отепляющего влияния водного потока, благодаря которым инициируется термосуффозия. Суффозионный вынос песчаного материала напорными водами в зоне их разгрузки выражается в виде грифонов (псевдовулканов). Появление зоны разгрузки подземных вод является своеобразным триггером термосуффозии, так как в этот момент градиент напорных вод достигает критической величины. При значениях этого градиента ниже критического термосуффозия не развивается, либо существенно замедляется.

Места с “дефектом” кровли межмерзлотного водоносного горизонта (области формирования критического значения градиента напора) являются одновременно и причиной термосуффозии и создают условия ее дальнейшего развития. При встрече напорных вод с пластом льда разрушение и таяние мерзлых грунтов могут пойти в горизонтальном направлении, с расширением фронта воздействия термосуффозии.

Потоки подземных вод в межмерзлотном водоносном горизонте, как показали исследования, выносят большой объем талых песчаных грунтов, образуя фактически пещеру, в которую происходит обрушение ее свода в виде провалов. То есть провалы происходят только в разветвления указанных пещер на исследуемой территории террасы р. Лена, и наличие полости (канала) в ММВГ — необходимое условие для образования провала.

Пьезометрический уровень вод ММВГ изменяется в течение года [3] и, вероятно, в многолетнем цикле. Это отражается на интенсивности процессов термосуффозии и, соответственно, в развитии таликов при подготовке провалов. По всей видимости, интенсивность термосуффозионных процессов является одним из существенных факторов подготовки провала.

Важный момент — механизм деформирования массива грунтов над полостью. По данным геофизических исследований установлено, что со временем происходит смещение кровли ММВГ вверх, в сторону дневной поверхности террасы. Соответственно, приближаются к границе сезонного протаивания пород указанные выше “ответвления” межмерзлотного талика. В работе [1] было отмечено, что обрушение кровли ММП происходит в момент, когда в полости возникает критическая ситуация по соотношению ее ширины и высоты. При этом нет данных о формировании полости в “ответвлениях” талика. Кроме того, установлено, что на выявленных участках возможных провалов имеются субэральные надмерзлотные талики, которые могут быть индикаторами под-

готовки провала и формирования воронки, в связи с появлением зоны ослабления и разгрузки напряжений.

Геофизические исследования и мониторинг процессов на рассматриваемом участке показали, что увеличение мощности межмерзлотного талика за счет смещения его кровли в ответвлениях от ММВГ на участке подготовки провала сопровождается просадкой дневной поверхности, подобной воронке, и образованию субэрального надмерзлотного талика сверху. Развитие талика и продвижение его кровли вверх к участку будущего провала вызывают (с позиций оценки изменения НДС в массиве) снижение прочности грунта, развитие деформаций и уменьшение (разгрузка напряжений) давления в точке массива. Мерзлые песчаные грунты при повышении температуры на 5–6°C снижают свою прочность в разы [9]. Водонасыщенный грунт в талом состоянии при положительных температурах, тем более при восходящей фильтрации, может приобрести текучее состояние. То есть происходит оседание мерзлых грунтов над тальми грунтами не над точкой, а над крупной, еще в значительной степени мерзлой структурой, которая готовится как ДГС к обрушению в виде провала.

Таким образом, процесс подготовки провала — это изменение НДС не в точке, а в более крупной структуре, которая при обрушении представлена цилиндрическим объемом. Образование провала в виде обрушения правильного цилиндрического объема грунта в подземную полость указывает на обусловленность этого явления изменением НДС и формированием соответствующих геологических структур по физико-геологическим законам.

Механизм подготовки провала с образованием новых ДГС можно представить следующим образом. Над межмерзлотным таликом в локальной части кровли водоносного горизонта происходит развитие вверх канала-ответвления в результате термосуффозии и восходящей фильтрации напорных вод. Возникают деформации оттаивающего грунта и снижение давления в грунте, причем не только в точках массива (по закону Кулона-Мора), но и по контуру канала-ответвления, где формируется граничная поверхность между оттаивающим и мерзлым грунтами. По физическим законам над зоной разгрузки напряжений и, соответственно, снижения давления в точках грунта действует давление от веса столба грунта диаметром, который регулируется параметрами канала с тальми грунтом. Основание столба мерзлого грунта представлено сводом над зоной разгрузки подземных вод в виде канала, заполненного тальми грунтом (см. рис. 5). Диаметр провала определяется из равновесия напряжений, действующих в основании свода и столба грунта над ним. При прогнозировании провала в связи с представленным механизмом возникают пробле-

мы с определением прочности грунта в основании упомянутого столба (свода) по причине большой ее изменчивости при переходе от мерзлого состояния к талому. Кроме того, изменчива высота столба грунта – будущего провала. В какой-то мере, при изучении карстового провала возникают подобные же трудности, так как над карстующимися породами имеется зона элювия – переходная зона изменения свойств от скальных грунтов к дисперсным песчано-глинистым.

При освоении исследуемой территории крайне важна оценка опасности образования провалов. Геофизические исследования вблизи федеральной автодороги А-360-Лена, которая проходит также по песчаной надпойменной террасе р. Лена, показали, что исследуемые процессы могут создать угрозу для движения транспорта [2]. Признаками опасности возникновения провалов являются наличие или возможность формирования потоков подземных вод в меж- и надмерзлотных водоносных таликах, развитие термосуффозии и полостей. При оценке опасности для существующих или проектируемых сооружений требуется, прежде всего, оценить возможный диаметр провала. Как указано выше, на исследуемой территории выявлены провалы диаметром от первых метров до 30 м [4].

Ниже приводятся расчеты диаметра возможных провалов на основе уравнения (1), полагая, что подготовка провала происходит по механизму формирования ДГС.

В уравнении предельного состояния (1) и выражении для определения радиуса провала (2) используются три исходных параметра:

γ – среднее значение удельных весов грунтов толщи в пределах глубины Z_a ;

Z_a – глубина до основания столба грунта, смещающегося вниз;

σ_{str} – структурная прочность грунта (прочность на одноосное сжатие) на глубине Z_a .

Среднее значение удельного веса мерзлых грунтов в расчетах можно принять 20 кН/м^3 (плотность мерзлых песчаных грунтов находится в пределах $1.9\text{--}2.1 \text{ г/см}^3$ [9]).

Глубина до кровли ММВГ (см. рис. 6), составляет в среднем $Z_a \approx 30 \text{ м}$. На участках возникновения талых “ответвлений” вверх от ММВГ мощность криогенного водоупора может уменьшаться до $Z_a \approx 15 \text{ м}$.

Структурная прочность песчаных грунтов, слагающих бестяхскую террасу р. Лена на исследуемом участке, изменяется в широких пределах в зависимости от состояния, в котором находится грунт (мерзлом или талом). Мерзлые грунты имеют высокую прочность, $\sigma_{str} > 1000 \text{ кПа}$ [9]. В этом случае $\sigma_{str}/\gamma > 30$, и в соответствии с (1) формирование провала не происходит, если грунт находится в мерзлом состоянии до глубины 30 м.

При таянии мерзлого грунта его структурная прочность снижается до значений $500\text{--}580 \text{ кПа}$ (прочность грунта на промежуточном этапе перехода от мерзлого состояния к талому). Согласно уравнениям (1) и (2) при $Z_a = 30 \text{ м}$ и $\gamma = 20 \text{ кН/м}^3$, получим следующие расчетные значения $R = 0.4\text{--}2.0 \text{ м}$, или значения диаметра провала $0.8\text{--}4.0 \text{ м}$.

Как указано выше, водонасыщенные грунты в межмерзлотном талике находятся в текучем состоянии. В области разгрузки подземных вод происходят практически свободное их движение, вынос песка и образование пустот и полостей. В этом случае структурная прочность пород талика в его кровле на активных участках действия термосуффозии может достигать нулевого значения, т.е. $\sigma_{str} \approx 0 \text{ кПа}$. Расчеты по формуле (1) дадут при $Z_a = 30\text{--}35 \text{ м}$ значения радиуса провала $R = 12\text{--}14 \text{ м}$, или диаметра $24\text{--}28 \text{ м}$.

При уменьшении глубины залегания кровли талика до значения $Z_a \approx 15 \text{ м}$ на участках развития термосуффозии вверх (см. рис. 7, 8) и $\gamma = 20 \text{ кН/м}^3$ получим следующие расчетные параметры провала:

при $\sigma_{str} \approx 0 \text{ кПа}$ – $R = 6 \text{ м}$, диаметр $2R = 12 \text{ м}$;

при $\sigma_{str} \approx 280 \text{ кПа}$ – $R = 0.4 \text{ м}$, диаметр $2R \approx 1 \text{ м}$;

при $\sigma_{str} \approx 300 \text{ кПа}$ и больше – $R = 0 \text{ м}$ (провал не возникает).

То есть при приближении кровли межмерзлотного талика к дневной поверхности диаметр возможного провала снижается. Максимальное его значение не может превысить 12 м .

Таким образом, реализация механизма формирования ДГС при подготовке провала над ММВГ и использование соответствующего уравнения предельного состояния грунтов перед обрушением провала позволяют определить возможные параметры провалов. Полученные результаты расчета диаметра провалов соответствуют данным мониторинга с выявлением существующих воронок, оценкой их параметров. **По расчетным и фактическим данным диаметры провалов варьируют от первых метров до 30 м.** Следует отметить, что, согласно использованной расчетной технологии, диаметр провала не зависит от размеров водоносного талика (объема талого грунта).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Институтом мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН установлено, что на исследуемом участке развит межмерзлотный талик, в котором происходит движение напорных подземных вод. В результате процессов термосуффозии изменяется положение кровли межмерзлотного водоносного горизонта с уменьшением мощности перекрывающего его криогенного водоупора и образованием локальных ответвлений талика вверх к участкам возможного образования провала.

В соответствии с исследованиями, проведенными ИМЗ СО РАН, полагается, что под действием напорных вод ММВГ и геостатического давления происходит локальное обрушение многолетнемерзлых пород в виде провала, когда достигается критическое соотношение между шириной и высотой полости [1].

Вместе с тем имеется много признаков, указывающих на возможность реализации механизма подготовки провала, основанном на трансформации исходного НДС мерзлых грунтов над полостью и образовании новых структур (ДГС) в виде свода и столба (объема) провала.

В качестве указанных признаков можно отметить следующие:

- приуроченность проявлений провалов к выявленным межмерзлотным водоносным горизонтам;
- межмерзлотный талик сложен разуплотненными, разупрочненными грунтами с повышенной пористостью; с образованием талика в толще ММП в разы уменьшается прочность грунтов, увеличивается их пористость;
- образование и развитие талика могут представляться как локальное внешнее силовое воздействие на геологическую среду, представленную толщей ММП, которое влияет на изменение исходного НДС окружающих грунтов и проявляется в виде понижения земной поверхности над местами роста талика вверх, наклонов деревьев к оси образуемой воронки;
- формирование зон разгрузки напряжений, пустот и полостей в талике, каналов движения подземных вод к местам их разгрузки;
- отсутствие влияния надмерзлотного водоносного горизонта на развитие процессов термосуффозии в ММВГ и образование талика снизу;
- влияние напора подземных вод на интенсивность процессов термосуффозии, но не на изменение НДС при формировании провала;
- наблюдаемые проявления недавних провалов имеют, как правило, достаточно четкие *цилиндрические* очертания.

О суффозионном разрушении грунтов в местах разгрузки напорных подземных вод свидетельствуют грифоны (*называемые также псевдовулканы*). Этот механизм не имеет в данном случае отношения к закономерностям образования провалов.

Уравнения предельного состояния грунтов над подземной полостью, полученные на основе механизма подготовки провала в соответствии с физико-геологическими закономерностями преобразования исходного НДС и формирования в грунтах над полостью ДГС, позволяют определить диаметр провала по данным положения кровли талика в ММП и прочности грунтов в зависимости от степени их оттаивания.

Расчетные значения диаметра провалов (от первых метров до 30 м) соответствуют данным мониторинга, который осуществляет ИМЗ СО РАН,

на рассматриваемом участке террасы р. Лена. Причем максимальные значения диаметров соответствуют большим глубинам залегания полости и состоянию талого грунта, близкому к текучему. По данным исследований ИМЗ СО РАН, это имеет место на участках, где в ММВГ выявлены пустоты, обеспечивающие свободное течение напорных подземных вод.

Авторы выражают надежду, что дальнейшее продолжение совместных исследований процессов образования провалов в ММП позволит получить новые данные о закономерностях и механизме подготовки разрушительных деформаций грунтовых массивов в виде провалов для обеспечения безопасного освоения территорий распространения ММП.

Анализ и интерпретация данных выполнены за счет средств государственного задания и плана НИР по теме № г.р. 122022400105-9. Полевые работы выполнены при поддержке гранта РФФ № 22-17-20040.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гагарин Л.А. Динамика термосуффозионных процессов в криолитозоне (на примере Центральной Якутии): автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Якутск, 2013. 21 с.
2. Гагарин Л.А., Бажин К.И., Оленченко В.В., Огонеров В.В., Цинбай Ву. Выявление участков потенциального термосуффозионного разуплотнения грунтов вдоль федеральной автодороги А-360 "Лена" в Центральной Якутии // Криосфера Земли. 2019. Т. XXIII. № 3. С. 61–68.
3. Гагарин Л.А., Семерня А.А., Лебедева Л.С. Оценка термосуффозионных процессов в центральной Якутии на примере участка Улахан-Тарын // Геоэкология. 2016. № 3. С. 252–262.
4. Оленченко В.В., Гагарин Л.А., Христофоров И.И., Колесников А.Б., Ефремов В.С. Строение участка развития термосуффозионных процессов в пределах бестяхской террасы реки Лены по геофизическим данным // Криосфера Земли. 2017. Т. XXI. № 5. С. 16–26.
5. Постоев Г.П. Модели механизма формирования и расчета параметров провалов земной поверхности над подземными полостями // Геоэкология. 2020. № 4. С. 36–47.
6. Постоев Г.П., Казеев А.И., Кучуков М.М. Физические законы распределения давления в геологической среде // Геоэкология. 2020. № 6. С. 22–31.
7. Постоев Г.П., Казеев А.И., Кучуков М.М. Геологические закономерности образования диссипативных геологических структур – оползневых блоков // Геоэкология. 2021. № 4. С. 33–40.
8. Хоменко В.П. Закономерности и прогноз суффозионных процессов. М.: ГЕОС, 2003. 216 с.
9. Шевелев А.С. Физико-механические характеристики многолетнемерзлых грунтов. М.: Стройиздат, 1979. 128 с.

ANALYSIS OF THE SINKHOLE FORMATION MECHANISM IN PERMAFROST ROCKS IN THE SITE OF INTRAPERMAFROST GROUNDWATER DEVELOPMENT WITH REGARDS OF DISSIPATIVE GEOLOGICAL STRUCTURES

G. P. Postoev^{a,#}, L. A. Gagarin^{b,##}, A. I. Kazeev^{a,###}, M. M. Kuchukov^{a,####}, and N. A. Pavlova^b

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

^b*Mel'nikov Permafrost Institute, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, ul. Merzlotnaya, 36, Yakutsk, Republic of Sakha (Yakutia), 677010 Russia*

[#]*E-mail: postoev.german@yandex.ru*

^{##}*E-mail: gagarinla@gmail.com*

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

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

The paper considers hazardous phenomena on the Earth's surface such as sinkholes within the Lena River floodplain terrace, the Central Yakutia, in the areas of intrapermafrost groundwater development. Possible mechanisms for the formation of a dip based on thermosuffusion and the mechanism of formation of dissipative geological structures are investigated. The materials of monitoring and geophysical works in the areas of manifestation of failures are analyzed.

Keywords: *permafrost, sinkhole, underground cavity, thermosuffusion, talik, dissipative geological structures (DGS), intrapermafrost groundwater, calculation of sinkhole parameters*

REFERENCES

- Gagarin, L.A. *Dinamika termosuffuzionnykh protsessov v kriolitozone (na primere Tsentral'noi Yakutii)* [Dynamics of thermosuffusion processes in permafrost (on the example of Central Yakutia)]. Extended abstract Cand. Sci. (Geol.-Min.) Dissertation, Yakutsk, 2013, 21 p. (in Russian)
- Gagarin, L.A., Bazhin, K.I., Olenchenko, V.V., Ogonerov, V.V., Tsinbay, Vu. *Vyyavleniye uchastkov potentsial'nogo termosuffuzionnogo razuplotneniya gruntov vdol' federal'noi avtodorogi A-360 "Lena" v Tsentral'noi Yakuti* [Identification of areas of potential thermal suffusion soil decompaction along the federal highway A-360 Lena in Central Yakutia]. *Kriosfera Zemli*, 2019, vol. XXIII, no. 3, pp. 61–68. (in Russian)
- Gagarin, L.A., Semernya, A.A., Lebedeva, L.S. *Otsenka termosuffuzionnykh protsessov v tsentral'noi Yakutii na primere uchastka Ulakhan-Taryn* [Assessment of thermosuffusion processes in Central Yakutia on the example of the Ulakhan-Taryn site]. *Geoekologiya*, 2016, no. 3, pp. 252–262. (in Russian)
- Olenchenko, V.V., Gagarin, L.A., Khristoforov, I.I., Kolesnikov, A.B., Efremov, V.S. *Stroyeniye uchastka razvitiya termosuffuzionnykh protsessov v predelakh bestyakhskoi terrasy reki Leny po geofizicheskim dannym* [The structure of the site for the development of thermosuffusion processes within the Bestyakhskaya terrace of the Lena River according to geophysical data]. *Kriosfera Zemli*, 2017, vol. XXI, no. 5, pp. 16–26. (in Russian)
- Postoev, G.P. *Modeli mekhanizma formirovaniya i rascheta parametrov provalov zemnoi poverkhnosti nad podzemnymi polostyami* [Models of the mechanism for the formation and calculation of the parameters of the sinkhole of the Earth's surface above underground cavities]. *Geoekologiya*, 2020, no. 4, pp. 36–47. (in Russian)
- Postoev, G.P., Kazeev, A.I., Kuchukov, M.M. *Fizicheskiye zakony raspredeleniya davleniya v geologicheskoi srede* [Physical laws of pressure distribution in the geological environment]. *Geoekologiya*, 2020, no. 6, pp. 22–31. (in Russian)
- Postoev, G.P., Kazeev, A.I., Kuchukov, M.M. *Geologicheskie zakonomernosti obrazovaniya dissipativnykh geologicheskikh struktur – opolznevykh blokov* [Geological patterns of formation of dissipative geological structures – landslide blocks]. *Geoekologiya*, 2021, no. 4, pp. 33–40. (in Russian)
- Khomenko, V.P. *Zakonomernosti i prognoz suffuzionnykh protsessov* [Patterns and forecast of suffusion processes]. Moscow, GEOS Publ., 2003, 216 p. (in Russian)
- Shevelev, A.S. *Fiziko-mekhanicheskie kharakteristiki mnogoletnemerzlykh gruntov* [Physico-mechanical characteristics of permafrost soils]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1979, 128 p. (in Russian)

ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

УДК 550.3

**ИЗМЕНЕНИЯ ГЕОДИНАМИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКИ, ПРОЯВИВШИЕСЯ
В ВАРИАЦИЯХ ПОЧВЕННОГО РАДОНА, ТЕМПЕРАТУРЫ
И АНОМАЛЬНЫХ ПРИРОДНЫХ ЯВЛЕНИЯХ
В ЗОНЕ КАТАВ-ИВАНОВСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 05.09.2018 ГОДА
НА ЮЖНОМ УРАЛЕ**

© 2023 г. А. К. Юрков^{1,*}, И. А. Козлова^{1,**}, С. В. Бирюлин^{1,***}, Б. Д. Хацкевич^{1,****}

¹Институт геофизики им. Ю.П. Булашевича УрО РАН,
ул. Амундсена, 100, Екатеринбург, 620016 Россия

*E-mail: akyurkov@mail.ru

**E-mail: ikozlova75@mail.ru

***E-mail: serrega2009@gmail.com

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

Поступила в редакцию 08.09.2022 г.

После доработки 26.01.2023 г.

Принята к публикации 30.01.2023 г.

5 сентября 2018 г. произошло самое сильное, из зарегистрированных за период инструментальных наблюдений, землетрясение на Урале в районе г. Катав-Ивановск Челябинской обл. с магнитудой $M_L = 5.4$. В октябре 2018 г. сотрудниками Института геофизики УрО РАН были организованы мониторинговые температурные и радоновые наблюдения. В рамках проведенных исследований показано, что закономерности поведения объемной активности радона (ОАР) при подготовке тектонического события, установленные для зоны субдукции (Южные Курилы), подтверждаются для Южно-Уральского региона. Отмеченные закономерности аномального поведения ОАР перед афтершоками в районе Катав-Ивановска характерны для зоны сжатия в зоне проведения радонового мониторинга. За период проведения температурных наблюдений с 28.11.2018 по 23.05.2019 г. зафиксировано увеличение температуры с градиентом 0.02°C в месяц. Выполнен анализ природных явлений, вызванных процессом подготовки землетрясения 2018 г. Установлено, что предполагаемые деформации сжатия проявились в гидрогеодинамическом поле по крайней мере за 10 лет до самого события. Приуроченность очагов землетрясений к выделенной асейсмичной зоне в границах Восточно-Европейской платформы Предуральяского краевого прогиба и Башкирского антиклинория свидетельствует о наиболее вероятных местах проявления сейсмических событий. Созданная сеть мониторинга температуры и радона в эпицентральной зоне по наблюдениям за афтершоками показала возможность отслеживания процесса подготовки землетрясения.

Ключевые слова: землетрясение, афтершок, мониторинг, температура, скважина, радон, Урал, асейсмичная зона

DOI: 10.31857/S086978092302011X, EDN: TWYNMW

ВВЕДЕНИЕ

Успешный прогноз готовящегося землетрясения возможен на основе выделения закономерностей проявления процесса его подготовки. Изучение процесса подготовки землетрясения представляет собой сложную задачу, определяемую не только выбором наблюдаемых физических явлений, которые сопровождают или вызываются подготовкой события, но и пространственно-временными характеристиками постановки таких наблюдений. Ясно, что изучение процесса подготовки землетрясения наиболее целесооб-

разно в сейсмически активных областях, где события происходят часто. Однако именно это обстоятельство и затрудняет поиск закономерностей при изучении конкретного землетрясения. В связи с этим наблюдение за подготовкой землетрясения в условиях отсутствия помех от других событий позволяет более надежно выделить и изучить наблюдаемые физические явления. Поэтому исследование явлений, наблюдаемых при Катав-Ивановском землетрясении 05.09.2018 г., имеет важное значение.

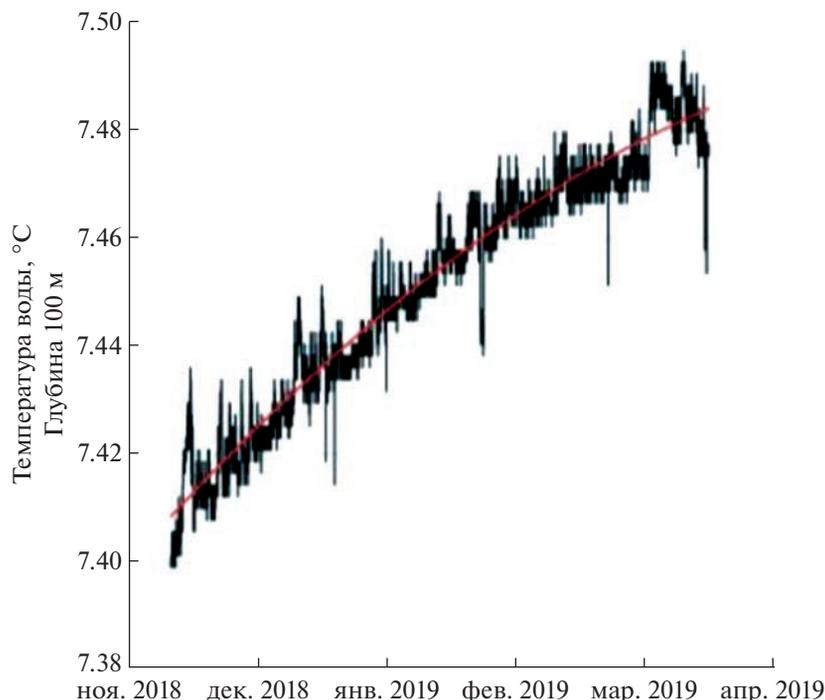


Рис. 1. Изменение температуры в скважине на глубине 95 м [6].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Землетрясение в районе г. Катав-Ивановск Челябинской обл. с локальной мгновенной магнитудой $M_L = 5.4$ оказалось неожиданным для данного района, хотя для Уральского региона не исключена повышенная сейсмичность. В соответствии с нормативными картами ОСП-2015 данная территория относится по шкале MSK к сейсмической 6-балльной зоне при повторяемости землетрясений 1 раз в 5000 лет¹. Фактически произошло самое сильное землетрясение на Урале из зарегистрированных за период инструментальных наблюдений. До этого наиболее значимыми землетрясениями были Билимбаевское (1914 г.) с ориентировочной магнитудой M_L около 5 и Средне-Уральское (Битимское, 2015 г.) с магнитудой M_L 4.7. Координаты эпицентра, глубина очага и магнитуда события были получены по данным удаленных сетей — Казахстанской и Пермской (ближайшие станции были расположены в обсерватории Арти и г. Уфа). Этим обусловлены большие погрешности в определении координат гипоцентра и магнитуды землетрясения.

В геологическом отношении Катав-Ивановское землетрясение локализовано в зоне сочленения Башкирского антиклинория, сложенного рифейскими образованиями, и Предуральского

краевого прогиба, сложенного флишево-молассовыми комплексами карбона-перми. Структура Башкирского антиклинория осложнена Каратауским блоком и Сулеймановской антиклиналью [8]. Установленная через некоторое время Горным институтом УрО РАН (г. Пермь) временная сеть сейсмических станций позволила более детально определить направление распространения афтершокового процесса.

В октябре 2018 г. Институтом геофизики УрО РАН были организованы мониторинговые температурные и радоновые наблюдения. Для проведения температурных измерений в водозаборной скважине (выведенной из эксплуатации) в г. Катав-Ивановск на глубине 95 м был установлен температурный логгер. За период наблюдений с 28.11.2018 по 23.05.2019 г. происходило увеличение температуры с градиентом 0.02°C в месяц (рис. 1) [7].

Радон является одним из вероятных предвестников землетрясений. Аномальные концентрации радона изучались различными специалистами в почвенном воздухе [13, 16, 17], приземной атмосфере [11, 15] и грунтовой воде [12, 14]. В рамках проведенного исследования наблюдения за объемной активностью радона (ОАР) были организованы в двух точках г. Катав-Ивановск (№ 1 — “гостиница”, № 2 — “Первомайская, 21”). Измерения проводились непрерывно в адвективном режиме с 4-часовым накоплением импульсов.

¹ СП 14.13330.2018. Строительство в сейсмических районах (актуализированная редакция СНиП II-7-81). <https://docs.cntd.ru/document/550565571>

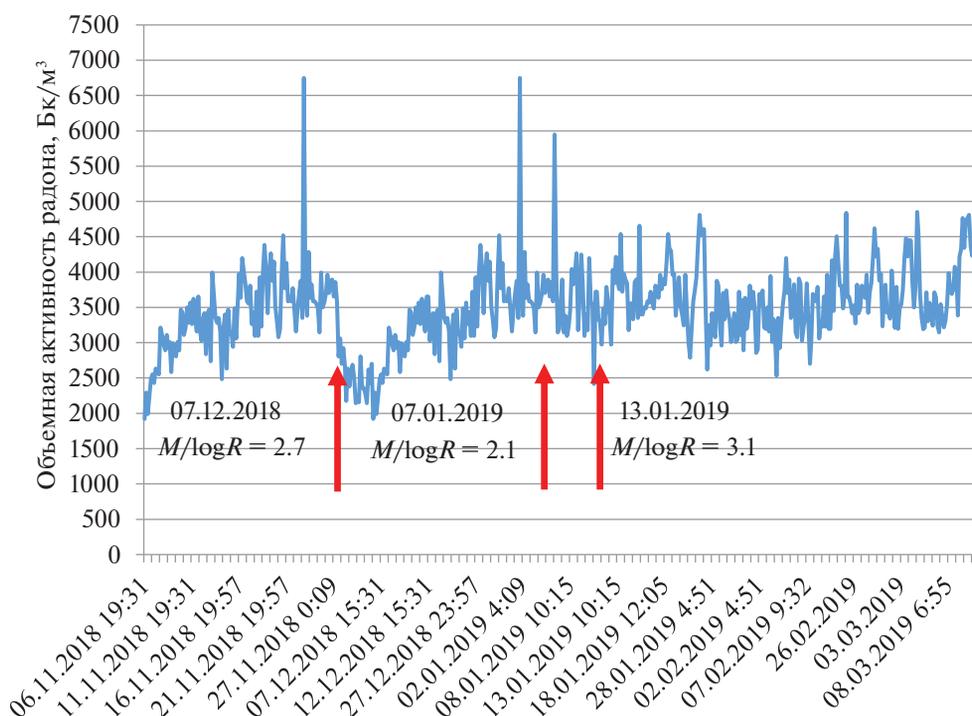


Рис. 2. Фрагмент записи вариаций ОАР на станции № 1 (г. Катав-Ивановск) с 6.11.2018 г. по 10.03.2019 г. Стрелками обозначены моменты афтершоков, сбоку указаны их параметры: дата и отношение магнитуды события к логарифму расстояния от эпицентра землетрясения до точки мониторинга.

Интерпретация получаемых данных основывалась на закономерностях поведения ОАР, установленных при подготовке землетрясений в Южно-Курильском регионе [4]. Выбор Южных Курил для изучения закономерностей отражения подготовки землетрясений был обусловлен большим количеством происходящих сейсмических событий в регионе и отсутствием существенных техногенных помех. Подобных условий нет ни в одном регионе России и мира. Для геодинамических условий зоны субдукции было установлено, что землетрясения отражаются на кривой ОАР только после прохождения максимума и только в том случае, если характеристики тектонического события соответствуют геодинамическому критерию (отношение магнитуды события к логарифму расстояния от эпицентра до станции мониторинга) больше 2.0. События разной удаленности от точки мониторинга отражаются на разных участках кривой ОАР. Для Южно-Курильского региона “дальние” (больше 180 км от точки мониторинга) землетрясения отражаются, начиная от точки максимума до выхода аномалии на фоновый уровень. “Ближние” землетрясения (расстояние от точки мониторинга меньше 130 км) отмечаются после выхода аномалии на фоновый уровень, в интервале времени до 28 сут [4].

Исходя из того, что расстояние от точки мониторинга до эпицентров афтершоков Катав-Ива-

новского землетрясения было около 10 км, они были отнесены к событиям “ближней” зоны. На рис. 2 приведен фрагмент записи поведения ОАР с 06.11.2018 по 10.03.2019 г. на станции № 1 и обозначены наиболее значимые афтершоки (по данным ФИЦ ЕГС РАН). Максимум 23.11.2018 г. вызван процессом подготовки группы афтершоков, произошедших 07.12.2018 г. Они отметились после выхода аномалии ОАР на фоновые значения. Максимумы 01.01.2019 и 06.01.2019 г. вызваны процессом подготовки афтершоков, произошедшими 10.01–14.01.2019 г. Эти события в кривых ОАР также отразились как события “ближней” зоны. Снижение амплитуды ОАР от афтершока 13.01.2019 г. объясняется ранее полученной закономерностью, когда при двух последовательных сейсмических событиях, следующих с промежуток времени менее 25 сут, радон не успевает накопиться в поровом пространстве [5]. По сейсмологическим данным афтершоковый процесс практически завершился в мае 2019 г. Магнитуда толчков после 13.03.2019 г. была в основном меньше 2.0, и они не отразились в кривых ОАР.

Отмеченные закономерности поведения ОАР характерны для зоны сжатия в зоне проведения радонового мониторинга. Косвенным подтверждением наличия сжимающих напряжений могут служить некоторые физические явления, отмеченные в зоне Катав-Ивановского землетрясения.

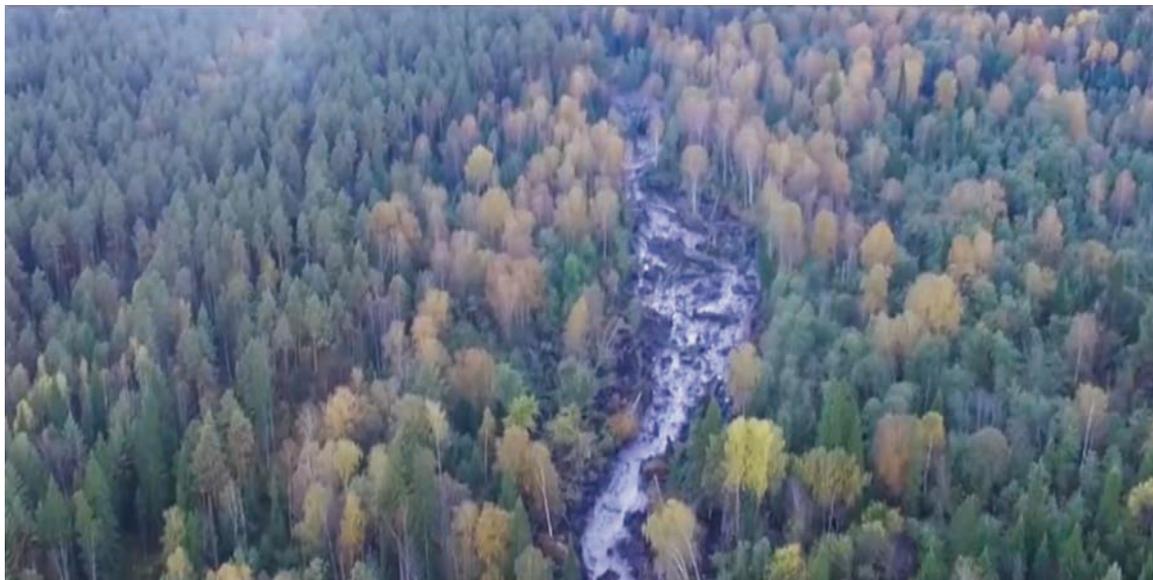


Рис. 3. Фрагмент оползня с горы Песчаная. Катав-Ивановск, сентябрь 2018 г. [6].

Несмотря на довольно ощутимые проявления данного землетрясения, по эмоциональной реакции населения и повреждению жилых и производственных объектов значительно большее внимание привлекло неординарное для Урала явление – грязевой оползень (рис. 3) [7].

Момент схода оползня точно не установлен. Информация о нем была получена в 20 числах сентября 2018 г. от местного населения. Неясно, связан ли оползень непосредственно с главным толчком, либо он инициирован последовавшими афтершоками. Изучение оползня позволило определить некоторые его характеристики и, самое главное, инициировало изучение особенностей состояния геологической среды в период, предшествовавший землетрясению 2018 г. В первую очередь был выполнен анализ сейсмологических данных. Составлен каталог произошедших сейсмических событий и выделившейся энергии за период с 2006 по 2018 г. [3, 6]. Согласно известным сейсмологическим прогностическим критериям (повышение сейсмической активности перед землетрясением и наличие сейсмической “брешы” (паузы)) приведенные данные явно не свидетельствовали о назревающем событии или его подготовке.

Других мониторинговых наблюдений за явлениями, отражающими процесс подготовки землетрясений в районе землетрясения, до события не проводилось. При сейсмологическом опросе после землетрясения жители рассказали о необычных природных явлениях, отмеченных в окрестностях района землетрясения. Так, в 2009 г. было зафиксировано появление термальной воды в 8-метровой водозаборной скважине в пос. Мин-

ка Усть-Катавского ГО по адресу ул. Первомайская, 27. По бытовым измерениям ее максимальная температура достигала 54°C. Описание аномального явления приводится по публикации в газете “Среди вершин” (<https://smotrim.ru/article/1388534>; <https://sv-uk.ru/news-2/community/incident/zemletryasenie-mozhno-bylo-predskazat/>). По данным из глубокой параметрической скважины Леузинская-1, расположенной в башкирской части Юрюзано-Сылвенской впадины Предуральского прогиба, вода с температурой 54°C должна быть на глубине порядка 2.5–3.0 км [2, 10]. Учитывая ее охлаждение при подъеме, можно говорить и о глубинах более чем 3 км. Таким образом, это уникальное явление свидетельствовало о том, что уже в 2009 г. в горных породах на глубине происходил процесс сжатия, который характерен для очага готовящегося землетрясения.

Из других, отмеченных населением необычных природных явлений, проявившихся уже после землетрясения, например, приток “грязной” воды в частную водозаборную скважину в селе Аратское Катав-Ивановского района после третьего ощутимого афтершока. По словам владельца, скважину пришлось дважды промывать. Очевидно, что это тоже свидетельствовало о проявлении процесса сжатия, который не прекратился после основного толчка.

Еще одним явлением, также связанным с проявлением процесса сжатия, можно считать образование “грязевых” пробок в скважинах на южном водозаборе Катав-Ивановска. Глубина водозаборных скважин находится в пределах 100 м. По мере эксплуатации в предшествовавший земле-

Таблица 1. Координаты наблюдательных станций и скорости их движения [9]

Станция	Координата X, м	Движение по X, мм/год	Координата Y, м	Движение по Y, мм/год
АКТО (АРТИ)	6281739.015	3.93 ± 0.78	3604633.743	23.78 ± 0.60
МТ (“Висим”)	6418270.359	3.72 ± 3.05	3544839.851	19.70 ± 2.49
УПМУ (“г Синяя”)	6471219.035	0.59 ± 5.26	3504658.611	20.68 ± 4.11
УОГС (“т. Волчиха”)	6326016.674	5.82 ± 2.48	3654711.718	20.45 ± 1.91
КУТЕ (“Кытлым”)	6623368.679	-1.60 ± 2.58	3345348.614	23.58 ± 1.97
ЗУЗЕ (“Сысерть”)	6289507.183	3.82 ± 2.57	3735635.755	22.89 ± 1.91
УЕКН (“Верхотурье”)	6552832.865	1.34 ± 2.25	3500740.088	21.48 ± 1.69

трясению период некоторые скважины для сохранения дебита нуждались в регулярной промывке. В ряде случаев из-за снижения и невозможности восстановления дебита их выводили из эксплуатации. При проверке таких нерабочих скважин было установлено, что 2 скважины, выведенные из эксплуатации, оказались глубиной 20 и 35 м вместо 100 м. В них образовались пробки из плотной субстанции (грязи). Глубина одной из проверенных нерабочих скважин была равна 100 м. Для проведения мониторинга в ней 28.10.2018 г. была установлена температурная станция (температурный логгер) на глубине 95 м. Для технического обслуживания станцию подняли 23.05.2019 г. При повторном спуске логгера 20.06.2019 г. оказалось, что глубина скважины стала равна 65 м. Поскольку скважина была полностью обсажена, то очевидно произошел подъем вещества более плотного, чем вода, и воду, как поршнем, выдавливало через устье скважины. Это свидетельствовало о том, что процесс сжатия сохранялся до мая 2019 г. В настоящее время ее глубина сохраняется на уровне 65 м, что косвенным образом может свидетельствовать о прекращении процесса сжатия. Как уже отмечалось, землетрясение 05.09.2018 г. сопровождалось продолжительным афтершоковым процессом. По сейсмологическим наблюдениям, афтершоки практически прекратились только к маю 2019 г. Это совпадает с временем прекращения изменения глубины наблюдательной скважины.

Произошедшие на Урале в последние годы два довольно крупные, по местным масштабам, сейсмические события говорят о наличии геодинамической активности данного региона. Предыдущее, сопоставимое по магнитуде с Катав-Ивановским, землетрясение случилось в 1914 г. Если посмотреть на расположение этих землетрясений с учетом геологических особенностей площадей, на которых произошли сейсмические события, то

можно отметить их приуроченность к обрамлению, практически асейсмичной зоны, выделенной в пределах Русской платформы, располагающуюся в пределах Предуральяского краевого прогиба, Башкирского антиклинория. Выделение асейсмичной зоны проводилось по отсутствию на данной площади известных землетрясений (рис. 4). Более наглядная картина получается, если рассмотреть положение очагов всех известных на сегодняшний день землетрясений на Урале. Они в основном располагаются в обрамлении выделенной асейсмичной зоны. Наличие тектонических напряжений в обрамлении асейсмичной зоны подтверждается результатами GPS-наблюдений, выполненных сотрудниками Института геофизики УрО РАН. Векторы движения реперов различаются и по величине, и по направлению (табл. 1). Расчет векторов движения реперов относительно обсерватории Арти, расположенной в пределах асейсмичной зоны, показывает их встречное направление на северной и южной границах зоны, что может свидетельствовать о процессе сжатия (рис. 5) [9].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате анализа инструментальных наблюдений и аномальных природных явлений в районе Катав-Ивановского землетрясения 2018 г. подтверждается наличие зоны сжатия, которая активизировалась за несколько лет до тектонического события. Предположительно, активизация связана с продолжающимся движением (по данным GPS-наблюдений) Евразии на северо-восток-восток со скоростью 28 мм в год. Отдельные блоки могут двигаться с иными скоростями, что может приводить к возникновению тектонических напряжений в них.

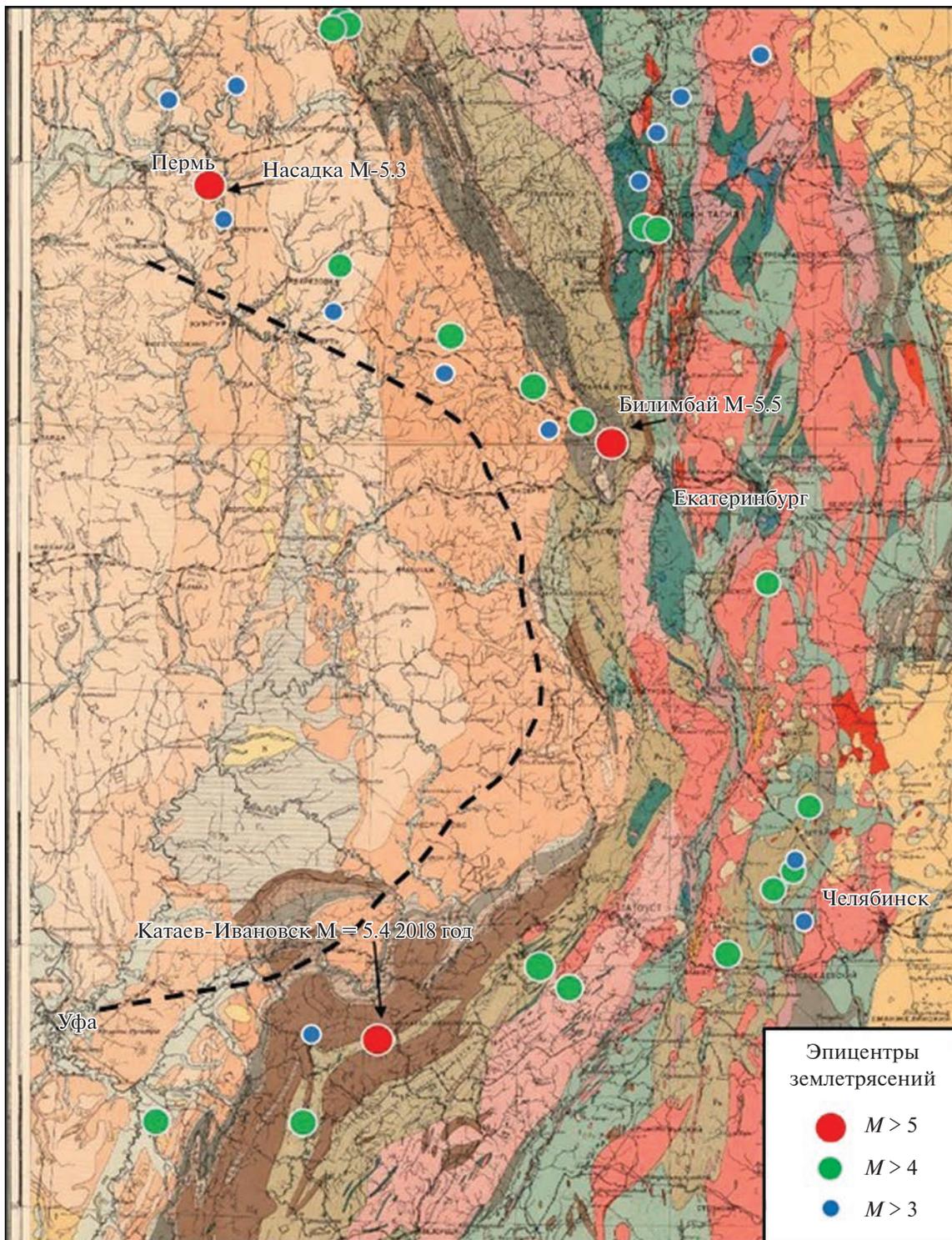


Рис. 4. Фрагмент геологической карты Среднего и Южного Урала [1] с расположением эпицентров наиболее крупных землетрясений на Урале с 1698 по 2018 г. Пунктирной линией отмечено ориентировочное положение асейсмической зоны по [3, 6].

Мониторинговые радоновые и температурные наблюдения в зоне землетрясения показали возможность оперативного контроля изменения гео-

динамической обстановки в области готовящегося землетрясения в Уральском регионе. Полученные закономерности поведения объемной

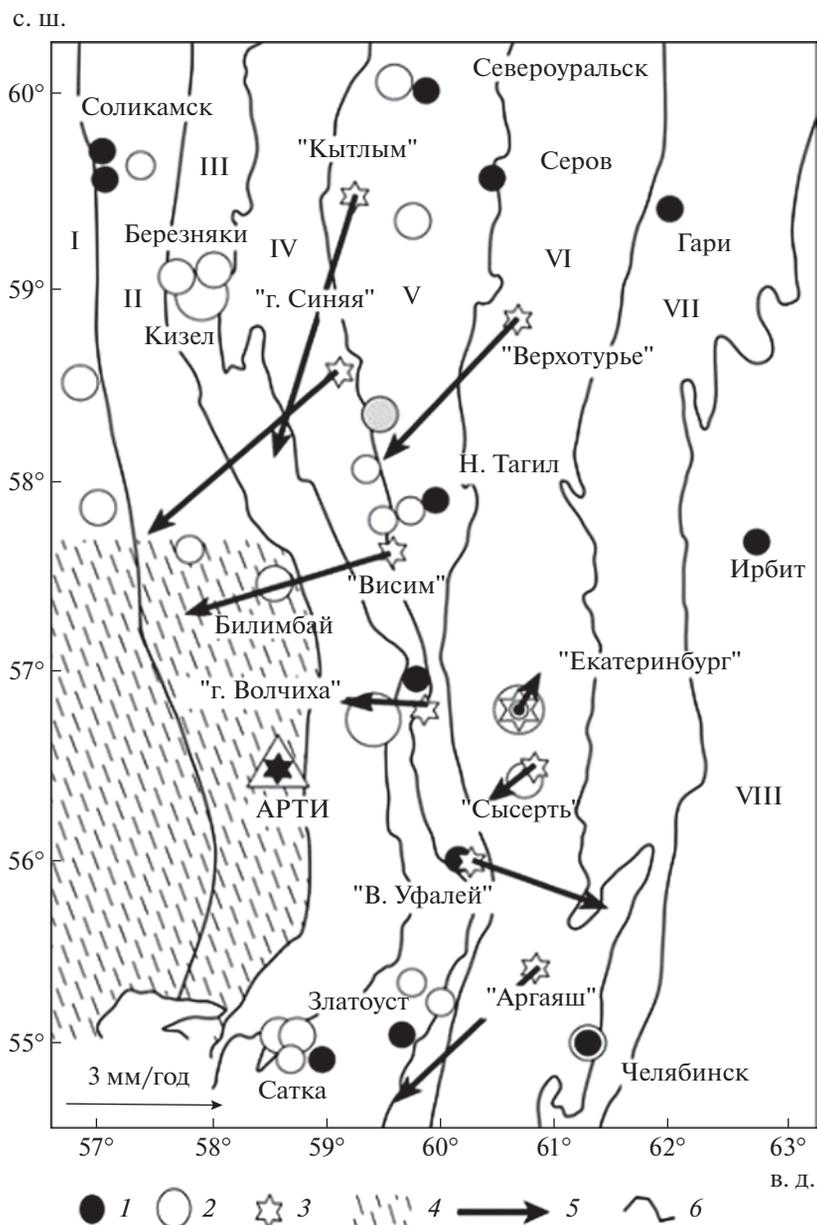


Рис. 5. Схема движения отдельных блоков Урала относительно обсерватории АРТИ. 1 – города; 2 – эпицентр землетрясений; 3 – станция GPS; 4 – зона “Уфимского выступа” (асейсмичная зона); 5 – направление движения реперов GPS; 6 – границы основных геологических структур Урала. Структуры первого порядка по [8]: I – Восточно-Европейская платформа, II – Предуральский краевой прогиб, III – Западно-Уральская зона складчатости, IV – Центрально-Уральское поднятие, V – Тагильско-Магнитогорский прогиб, VI – Восточно-Уральское поднятие, VII – Восточно-Уральский прогиб, VIII – Зауральское поднятие.

активности радона при подготовке землетрясений в Южно-Курильском регионе оказались применимы в условиях Урала.

Для дальнейшего наблюдения геодинамической активности Среднего и Южного Урала необходимо продолжение мониторинга радона и температуры на северных и южных границах выделенной асейсмичной зоны.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Геологическая карта Урала. М: 1:1000000. Составлена: Главное геолого-разведочное управление. Под ред. Д.В Наливкина, Н.К. Высоцкого, 1930. http://etomesto.ru>map-atlas_geologiya_ural-1930/
2. Голованова И.В., Сальманова Р.Ю., Тагирова Ч.Д. Оценка температуры глубоких горизонтов западной части республики Башкортостан // Электрон-

- ный научный журнал “Нефтегазовое дело”. 2013. № 2. С. 19–31.
3. *Дзягилев Р.А., Верхоланцев Ф.Г., Варлашова Ю.В. и др.* Катав-Ивановское землетрясение 04.09.2018 г., $m_b = 5.4$ (Урал) // Российский сейсмологический журнал. 2020. Т. 2. № 2. С. 7–20. <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2020.2.01>
 4. *Козлова И.А., Бирюлин С.В., Юрков А.К., Демежко Д.Ю.* Изменения объемной активности почвенного радона и температурные вариации в скважине во время процесса подготовки землетрясения // Геоэкология. 2021. № 6. С. 28–36. <https://doi.org/10.31857/S0869780921060059>
 5. *Козлова И.А., Юрков А.К.* Отражение последовательных сейсмических событий в поле объемной активности радона // Уральский геофизический вестник. 2016. № 1 (27). С. 35–39.
 6. *Маловичко А.А., Морозов А.Н., Ваганова Н.В. и др.* Билимбаевское землетрясение 17 августа 1914 г.: параметры гипоцентра по инструментальным данным // Российский сейсмологический журнал. 2020. Т. 2. № 1. С. 40–47. <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2020.1.04>
 7. *Овчаренко А.В., Давыдов В.А., Щанов В.А., Юрков А.К.* Геофизические исследования в эпицентральной области Катав-Ивановского землетрясения (05.09.2018, $M_{5.8}$) // Литосфера. 2020. № 20 (3). С. 432–448. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2020-20-3-432-448>
 8. *Тевелев Ал.В., Тевелев Арк.В., Хотылев А.О., Прудников И.А. и др.* Тектоническая обстановка в районе Катав-Ивановского землетрясения в сентябре 2018 г. (Южный Урал) // Вестник МГУ. 2019. Сер. 4. Геология. № 2. С. 23–29.
 9. *Уткин В.И., Белоусова А.А., Тягунов Д.С., Баландин Д.В.* Исследование геодинамики Северного и Среднего Урала по данным GPS // ДАН. 2010. Т. 431. № 2. С. 246–251.
 10. *Щанов В.А.* Геотермические исследования Урала: дис. ... д. геол.-мин. наук: 25.00.10. Екатеринбург, 2006. 216 с. <http://www.dslib.net/geo-fizika/geotermicheskie-issledovaniya-urala.html>
 11. *Albarelo D.* Short-term earthquake prediction and preparation // DPC-INGV-S3 Project, Final report. 2013. 31 p.
 12. *Favara R., Grassa F., Inguaggiato S., Valenza M.* Hydrogeochemistry and stable isotopes of thermal springs: earthquake-related chemical changes along Belice Fault (Western Sicily) // Applied Geochemistry. 2001. V. 16. N 1. P. 1–17.
 13. *King C.Y.* Radon monitoring for earthquake prediction in China // Earthquake Prediction Research. 1985. Vol. 3. N 1. P. 47–68.
 14. *Kuo T., Fan K., Kuochen H., Han Y., Chu H., Lee Y.* Anomalous decrease in groundwater radon before the Taiwan M6.8 Chengkung earthquake // Journal of Environmental Radioactivity. 2006. Vol. 88. N 1. P. 101–106.
 15. *Omori Y., Yasuoka Y., Nagahama H., Kawada Y., Ishikawa T., Tokonami S., Shinogi M.* Anomalous radon emanation linked to preseismic electromagnetic phenomena // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 2007. № 7. P. 629–635.
 16. *Ramola R.C., Prasad Y., Prasad G., Kumar S., Choubey V.M.* Soil-gas radon as seismotectonic indicator in Garhwal Himalaya // Applied Radiation and Isotopes. 2008. Vol. 66. № 10. P. 1523–1530.
 17. *Walia V., Lin S.J., Hong W.L., Fu C.C., Yang T.F., Wen K.L., Chen C.H.* Continuous temporal soil-gas composition variations for earthquake precursory studies along Hsincheng and Hsinhua faults in Taiwan // Radiation Measurements. 2009. V. 44. № 9–10. P. 934–939.

CHANGES IN GEODYNAMIC SITUATION MANIFESTED IN SOIL RADON AND TEMPERATURE VARIATIONS AND ABNORMAL NATURAL PHENOMENA IN THE ZONE OF KATAV-IVANOVSK EARTHQUAKE (05.09.2018), THE SOUTHERN URALS

A. K. Yurkov^{a,##}, I. A. Kozlova^{a,##}, S. V. Biryulin^{a,###}, and B. D. Khatskevich^{a,####}

^a*Institute of Geophysics, Ural Branch, RAS,
ul. Amundsena 100, Yekaterinburg, 620016 Russia*

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

^{##}*E-mail: ikozlova75@mail.ru*

^{###}*E-mail: serrega2009@gmail.com*

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

The strongest earthquake in the Urals registered during the period of instrumental observations, with a magnitude of $M_L-5.4$ occurred in the area of Katav-Ivanovsk city, Chelyabinsk region, on 05.09.2018. In October 2018, Institute of Geophysics, the Ural Branch RAS organized temperature and radon observations. The conducted studies have shown that the behavior patterns of the volume radon activity (VRA) established for the tectonic event preparation in the subduction zone (Southern Kuriles), are also true for the South Ural region. The natural phenomena caused by the earthquake 2018 preparation are analyzed. During the observation period from 28.11.2018 to 23.05.2019, there was an increase in temperature with a gradient of 0.02°C per month. The observed patterns of VRA abnormal behavior before aftershocks in the Katav-Ivanovsk area are typical

for the compression zone in the radon monitoring area. It is noted that the assumed compression deformations were manifested in the hydrogeodynamic field at least 10 years before the event proper. The proximity of earthquake foci to the identified aseismic zone within the boundaries of the East European Platform, the Pre-Ural Regional Trough, and the Bashkir anticlinorium indicates the most likely places of seismic events. The arranged temperature and radon monitoring network in the epicentral zone by observing aftershocks has shown the possibility of tracking the earthquake preparation process.

Keywords: earthquake, aftershock, monitoring, temperature, borehole, radon, Ural, aseismic zone

REFERENCES

1. Geological map of the Urals. M: 1:1000000. Compiled by: The Main Geological Exploration Department. Edited by D.V. Nalivkin, N.K. Vysotsky, 1930. http://etomesto.ru/map-atlas_geologiya_ural-1930/
2. Golovanova, I.V., Sal'manova, R.Yu., Tagirova, Ch.D. *Otsenka temperatury glubokikh gorizontov zapadnoi chasti respubliki Bashkortostan* [Deep horizons temperature assessment in the western part of the Republic of Bashkortostan]. *Neftegazovoe delo*, 2013, no. 2, pp. 19–31. (in Russian)
3. Dyagilev, R.A., Verkholtantsev, F.G., Varlashova, Yu.V., et al. *Katav-Ivanovskoe zemletryasenie 04.09.2018, $m_b = 5.4$ (Ural)* [Katav-Ivanovsk earthquake on 04.09.2018, $m_b = 5.4$ (Urals)]. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal*, 2020, vol. 2, no. 2, pp. 7–20. <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2020.2.01>. (in Russian)
4. Kozlova, I.A., Biryulin, S.V., Yurkov, A.K., Demezhko, D.Yu. *Izmeneniya ob'emnoi aktivnosti pochvennogo radona i temperaturnye variatsii v skvazhine vo vremya protsessy podgotovki zemletryaseniya* [Volume radon activity changes and temperature variations in the well during earthquake preparation]. *Geoekologiya*, 2021, no. 6, pp. 28–36. <https://doi.org/10.31857/S0869780921060059>. (in Russian)
5. Malovichko, A.A., Morozov, A.N., Vaganova, N.V. et al. *Bilimbaevskoe zemletryasenie 17 avgusta 1914 g.: parametry gipotsentra po instrumental'nym dannym* [The Bilimbai earthquake on August 17, 1914: the hypocenter location based on instrumental data]. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal*, 2020, vol. 2, no. 1, pp. 40–47. <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2020.1.04>. (in Russian)
6. Kozlova, I.A., Yurkov, A.K. *Otazhenie posledovatel'nykh seismicheskikh sobytii v pole ob'emnoi aktivnosti radona* [Reflection of consecutive seismic events in the field of radon volume activity]. *Ural'skii geofizicheskii vestnik*, 2016, no. 1 (27), pp. 35–39. (in Russian)
7. Ovcharenko, A.V., Davydov, V.A., Shchapov, V.A., Yurkov, A.K. *Geofizicheskie issledovaniya v epitsentral'noi oblasti Katav-Ivanovskogo zemletryaseniya (05.09.2018, M5.8)* [Geophysical study in the epicentral area of the Katav-Ivanovsk earthquake (05.09.2018, M5.8)]. *Litosfera*, 2020, no. 20 (3), pp. 4320–448. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2020-20-3-432-448>. (in Russian)
8. Tevelev, A.I.V., Tevelev, Ark.V., Khotylev, A.O., Prudnikov, I.A., et al. *Tektonicheskaya obstanovka v raione Katav-Ivanovskogo zemletryaseniya v sentyabre 2018 g. (Yuzhnyi Ural)* [Tectonic situation in the area of Katav-Ivanovsk earthquake in September 2018 (the Southern Urals)]. *Vestnik MGU, Ser. 4. Geologiya*, 2019, no. 2, pp. 23–29. (in Russian)
9. Utkin, V.I., Belousova, A.A., Tyagunov, D.S., Balandin, D.V. *Issledovanie geodinamiki Severnogo i Srednego Urala po dannym GPS* [The study of geodynamics in the Northern and Middle Urals by GPS data]. *Doklady Akademii nauk*, 2010, vol. 431, no. 2, pp. 246–251. (in Russian)
10. Shchapov, V.A. *Geotermicheskie issledovaniya Urala* [Geothermal studies in the Urals]. Doctoral (Geol.-Min.) Dissertation, Yekaterinburg, 2006, 216 p. (in Russian)
11. Albarello, D. Short-term earthquake prediction and preparation. *DPC-INGV-S3 Project, Final report*. 2013. 31 p.
12. Favara, R., Grassa, F., Inguaggiato, S., Valenza, M. Hydrogeochemistry and stable isotopes of thermal springs: earthquake-related chemical changes along Belice Fault (Western Sicily). *Applied Geochemistry*, 2001, vol. 16, no. 1, pp. 1–17.
13. King, C.Y. Radon monitoring for earthquake prediction in China. *Earthquake Prediction Research*, 1985, vol. 3, no. 1, pp. 47–68.
14. Kuo, T., Fan, K., Kuo Chen, H., Han, Y. et al. Anomalous decrease in groundwater radon before the Taiwan M6.8 Chengkung earthquake. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2006, vol. 88, no. 1, pp. 101–106.
15. Omori, Y., Yasuoka, Y., Nagahama, H., Kawada, Y. et al. Anomalous radon emanation linked to preseismic electromagnetic phenomena. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci*, 2007, no. 7, pp. 629–635.
16. Ramola, R.C., Prasad, Y., Prasad, G., Kumar, S., Choubey, V.M. Soil-gas radon as seismotectonic indicator in Garhwal Himalaya. *Applied Radiation and Isotopes*, 2008, vol. 66, no. 10, pp. 1523–1530.
17. Walia, V., Lin, S.J., Hong, W.L., Fu, C.C. et al. Continuous temporal soil-gas composition variations for earthquake precursory studies along Hsincheng and Hsinhua faults in Taiwan. *Radiation Measurements*, 2009, vol. 44, no. 9–10, pp. 934–939.

ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

УДК 551.4.012

ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЯ ПРИРОДНЫХ РИСКОВ В ПРЕДЕЛАХ ЭРОЗИОННО-ТЕРМОКАРСТОВЫХ РАВНИН ПОД ДЕЙСТВИЕМ КЛИМАТИЧЕСКИХ ТРЕНДОВ

© 2023 г. А. С. Викторов^{1,*}, В. Н. Капралова¹, М. В. Архипова¹, Т. В. Орлов¹¹Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева Российской академии наук
Уланский переулок, 13, стр. 2, Москва, 101000 Россия

*E-mail: vic_as@mail.ru

Поступила в редакцию 05.09.2022 г.

После доработки 04.11.2022 г.

Принята к публикации 21.11.2022 г.

Актуальность оценки риска для инженерных сооружений в условиях опасных геологических процессов определяется все более изменяющимися природными условиям в зонах многолетней мерзлоты. Статистический подход к исследованию сопровождается определенными трудностями, так как накопление статистики требует значительного времени, и это время зачастую сравнимо со временем функционирования сооружения. Главный и наиболее трудный этап оценки риска – оценка вероятности поражения инженерных сооружений опасным геологическим процессом. Целью исследования являлось обоснование способа решения данной задачи на территории эрозионно-термокарстовых равнин для линейных объектов с помощью методов математической морфологии ландшафта, который позволяет перейти к количественной оценке риска. При применении методов математической морфологии ландшафта любая неоднородная территория предварительно разбивается на участки, однородные по условиям протекания процессов. В основе методики лежит разработанная авторами модель развития морфологической структуры эрозионно-термокарстовой равнины в условиях асинхронного старта, реализующаяся по данным эмпирической проверки в наибольшем числе случаев. Модель применялась на 4 ключевых участках, расположенных в разных физико-географических условиях, но имеющих морфологическую однородность. По материалам космической съемки разных сроков проводилось дешифрирование термокарстовых озер и хасыре-ев. Средняя плотность числа поражений на разных участках колеблется 0.00026 год^{-1} до 0.00104 год^{-1} , при этом четкой тенденции изменения во времени не наблюдается. По количественным экспериментальным данным наблюдается дифференцированное по участкам изменение риска поражений линейных сооружений в пределах эрозионно-термокарстовых равнин за последние несколько десятков лет (46–56 лет). Вероятность поражения линейных сооружений значительно изменилась (6–9 раз) на лишь одном участке (Яно-Индибирская низменность), что подтверждает критерий хи-квадрат. Такая ситуация наблюдается при длинах линейных сооружений 3–4 км. Однако на большей части ключевых участков отсутствует значимое изменение вероятности поражения, несмотря на идущие климатические изменения.

Ключевые слова: математическая модель, морфология ландшафта, криолитозона, опасные геологические процессы, оценка риска

DOI: 10.31857/S0869780923030128, EDN: WNOINK

ВВЕДЕНИЕ

Оценка риска в условиях развития опасных геологических процессов – одна из актуальных задач, особенно она важна в быстро изменяющихся природных условиях северных регионов. Наиболее часто мерой риска является один из следующих параметров [4]:

– вероятность той или иной степени поражения инженерного сооружения опасным геологическим процессом,

– средний риск – математическое ожидание величины поражения (например, площади или длины) инженерного сооружения опасным геологическим процессом,

– вероятностное распределение величины поражения инженерного сооружения опасным геологическим процессом (общей величины поражения инженерного сооружения, величины поражения единицы длины и др.).

– предельное значение величины поражения инженерного сооружения опасным геологическим процессом.

Оценке риска поражения инженерных сооружений посвящено много исследований [2, 4–7 и др.]. Как правило, оценка риска нужна в момент проектирования сооружений, расположенных на конкретной территории и в конкретных природных условиях. При статистическом подходе исследователь сталкивается с определенными проблемами, поскольку накопление статистики требует значительного времени, которое зачастую сравнимо со временем функционирования сооружения. Главным и наиболее трудным этапом оценки риска является оценка вероятности поражения инженерных сооружений опасным геологическим процессом.

Мы попытались развить и обосновать способ решения данной задачи на территории эрозионно-термокарстовых равнин для линейных объектов с помощью методов математической морфологии ландшафта, позволяющих перейти к количественной оценке риска.

При использовании предлагаемого подхода задача оценки риска решается для однородного участка, поэтому при применении методов математической морфологии ландшафта любую неоднородную территорию надо предварительно разбить на участки, однородные по условиям протекания процессов.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В основу решения задачи положена разработанная авторами модель развития морфологической структуры эрозионно-термокарстовой равнины в условиях асинхронного старта, реализующаяся по данным эмпирической проверки в наибольшем числе случаев [9]. Она основывается на следующих допущениях:

1. Возникновения первичных термокарстовых понижений (очагов) за непересекающиеся отрезки времени и на непересекающихся площадках являются независимыми случайными событиями; вероятность возникновения понижения зависит только от величины отрезка времени и размеров площадки.¹

2. Возникновение первичных термокарстовых понижений не происходит на площади существующих термокарстовых озер.

3. Изменение радиуса возникшего термокарстового понижения представляет собой случайный процесс; оно происходит независимо от других озер, и его скорость, находясь под воздей-

ствием случайных факторов, при этом пропорциональна плотности тепловых потерь через боковую поверхность озерной котловины.

4. В процессе роста озеро может перейти в хасырей при его спуске эрозионной сетью, вероятность этого не зависит от других озер; при этом рост озера прекращается.

5. Возникновения истоков эрозионных форм на непересекающихся площадках являются независимыми случайными событиями, и вероятность их определяется только величиной площадки².

Анализ вероятности поражения линейного сооружения в условиях эрозионно-термокарстовых равнин учитывал следующие факторы:

– возможность поражения растущими очагами термокарстового процесса:

○ существовавшими к началу периода функционирования сооружения,

○ возникшими уже в период функционирования сооружения;

– возможность остановки роста термокарстового очага эрозионными процессами и ликвидации риска для линейного сооружения,

– возможность поражения растущими очагами термокарстового процесса с их последующей (после поражения сооружения) трансформацией в хасырей.

Согласно полученным результатам [1], по прошествии значительного времени, когда возникает состояние динамического равновесия морфологической структуры эрозионно-термокарстовых равнин, распределение размера (площади) озера становится интегрально-экспоненциальным распределением.

В итоге математического анализа модели были получены выражения, характеризующие вероятность поражения линейного сооружения очагами термокарстового процесса за заданное время функционирования. Распределение числа поражений линейного сооружения за заданный интервал времени как существующими, так и выродившимися (в настоящее время трансформировавшимися в хасырей) очагами должно отвечать распределению Пуассона [8]. При использовании линейных приближений число поражений можно рассматривать как пуассоновский процесс.

ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЭРОЗИОННО-ТЕРМОКАРСТОВЫХ РАВНИН

Апробация модели проводилась на 4 тестовых участках общей площадью 6442 км², расположенных в разных физико-географических условиях

¹ При этом для малых площадок и временных отрезков вероятность возникновения нескольких понижений много меньше, чем вероятность возникновения одного понижения.

² При этом для малых площадок вероятность наличия более чем одного истока много меньше, чем вероятность наличия одного истока.



Рис. 1. Схема расположения ключевых участков.

(рис. 1). При выборе участков руководствовались морфологической однородностью участка и наличием данных дистанционного зондирования на данную область.

Все участки представляют собой тундровые равнины, сложенные среднечетвертичными аллювиальными отложениями разной льдистости и расположены на террасах речных долин и морских террасах.

Материалы аэро- или космической съемки выбраны с учетом возможной максимизации пространственного разрешения и получения существенных временных интервалов между сроками съемок.

Дешифрирование активных и вырожденных (хасыреи) термокарстовых очагов выполнялось в интерактивном режиме с повторной проверкой и сравнением дешифрирования разных сроков. Последнее осуществлялось для исключения кажущихся изменений.

Формирование массива модельных линейных инженерных сооружений в пределах каждого участка выполнялось в среде ARCGIS с использованием датчика случайных чисел. Для каждой пары сроков съемки моделировалась ситуация создания линейного сооружения в первый срок и подсчета частоты поражения по второму сроку. Для этого случайным образом (с использованием датчика случайных чисел) набрасывался массив фрагментов линейных сооружений фиксированной длины и параллельного направления на изображение срока 1. Из них отбраковывались сооружения, пересекавшие активные очаги (таким образом моделировалось создание линейных сооружений, обходящих существующие термокарстовые очаги). Получившийся откорректированный массив сравнивался с изображением срока 2, и подсчитывалась частота поражения. Процедура повторялась для разных длин модельных соору-

жений (1.0, 2.0 и 3.0 км). Объем выборок (после отбраковки) составлял 104–392 элемента.

На последнем этапе для каждого участка сравнивались частоты поражения линейных инженерных сооружений для разных временных интервалов. Изображения участков на космических снимках разных сроков приведены на рис. 2 а–г.

На каждой паре изображений, отвечающих разным срокам съемки, согласно методике, производилось расположение случайным образом (рис. 3) линейных инженерных сооружений с последующей отбраковкой; для этого использовались датчики случайных чисел. Данные по конкретным объемам полученных в итоге выборок приведены в табл. 1.

В процессе сравнения проверялась гипотеза о неизменности параметров случайного процесса, а именно параметра средней плотности числа поражений линейных сооружений (среднее число поражений отрезка сооружения рассматриваемой длины в единицу времени) за первый и второй временной интервалы. Проверка базировалась на ранее полученном результате, что при отсутствии климатического тренда на однородном участке эрозионно-термокарстовой равнины распределение числа поражений описывается пуассоновским распределением. При этом, если использовать для среднего числа поражений линейное приближение по времени, то средняя плотность поражений должна оставаться постоянной.

В связи с этим проверка производилась согласно следующей процедуре:

1) определение среднего значения *числа поражений* θ_1 отрезка сооружения рассматриваемой длины L за первый временной интервал:

$$\theta_1 = \frac{k}{n_1} \quad (1)$$

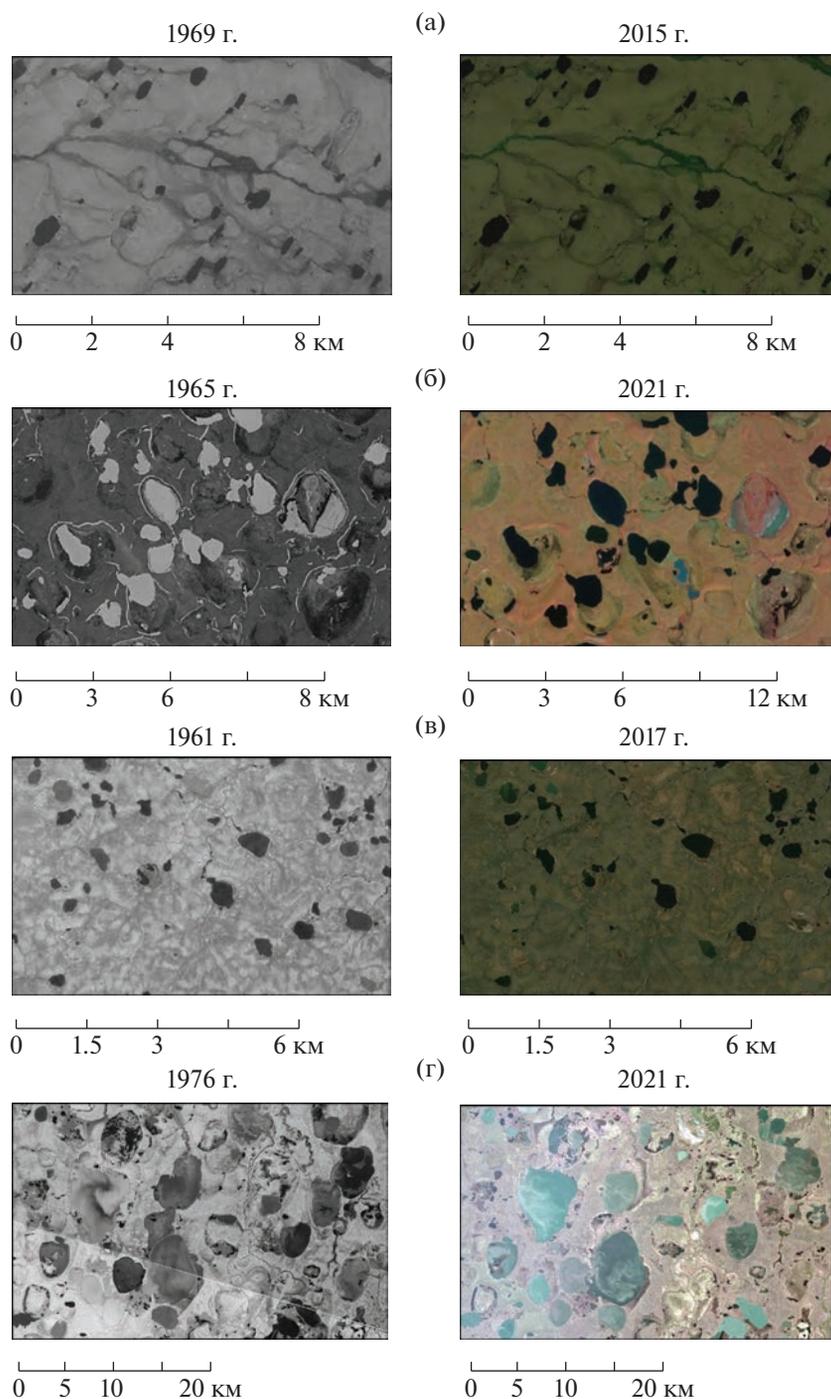


Рис. 2. Примеры изображения ключевых участков на материалах космической съемки: а – участок 40, б – участок 28, в – участок 30, г – участок 35.

2) определение среднего значения плотности поражений λ_1 отрезка сооружения рассматриваемой длины L за первый временной интервал:

$$\lambda_1 = \frac{k_1}{t_1 n_1}. \quad (2)$$

3) определение теоретического значения *среднего числа поражений* отрезка сооружения той же длины L за 2-й интервал по данным 1-го интервала, которое при истинности проверяемой гипотезы равно

$$\theta_2 = \lambda_1 t_2, \quad (3)$$

Таблица 1. Среднее число поражения модельных линейных сооружений для разных временных интервалов

Индекс участка, регион	Длина модельного сооружения, км	Временной интервал, длительность					
		Число модельных сооружений	Средняя плотность поражений λ_1 , год ⁻¹	Число модельных сооружений	Средняя плотность поражений λ_1 , год ⁻¹	Число модельных сооружений	Средняя плотность поражений λ_1 , год ⁻¹
28 Кольская низменность		1965–2013 48 лет		2013–2021 8 лет		1965–2021 56 лет	
	1	332	0.00044	326	0.00038	332	0.00043
	2	163	0.00077	157	0.00075	163	0.00077
3	185	0.00090	180	0.00075	185	0.00088	
30 Ямал		1961–1979 28 лет		1979–2017 38 лет		1961–2017 66 лет	
	1	104	0.00104	101	0.00026	104	0.00058
	2	283	0.00014	282	0.00011	283	0.00006
3	176	0.00039	174	0.00045	176	0.00042	
40 Чукотка		1969–1980 11 лет		1980–2015 35 лет		1969–2015 46 лет	
	1	392	0.00073	389	0.00037	392	0.00043
	2	321	0.00027	320	0.00026	321	0.00026
3	176	0.00100	174	0.00049	176	0.00061	
35 Яно-Инди- гир- ская низмен- ность		1976–1999 23 года		1999–2021 22 года		1976–2021 45 лет	
	2	210	0.00083	206	0.00045	210	0.00064
	3	171	0.00026	170	0.00159	171	0.00091
	4	133	0.00035	132	0.00277	133	0.00151

Таблица 2. Сравнение расчетной вероятности поражения модельных линейных сооружений на втором временном интервале с фактической частотой поражения

Индекс участка, регион	Длина отрезка, км	Временной интервал, длительность					Фактическая частота поражения
		Среднее число поражений θ_1	Частота поражений k_2	Расчетное среднее число поражений (интервал 1), θ_2	Расчетная вероятность поражения (по данным интервала 1), $P(k_2)$	Значение критерия хи-квадрат	
28 Колымская низменность		Интервал 1 1965–2013 48 лет		Интервал 2013–2021 8 лет			
	1	0.018	1	0.003	0.003	0.017	0.003
	2	0.037	1	0.006	0.006	0.002	0.006
	3	0.043	1	0.006	0.005	0.058	0.006
30 Ямал		Интервал 1 1961–1979 28 лет		Интервал 2 1979–2017 38 лет			
	1	0.029	1	0.039	0.038	2.221	0.010
	2	0.004	1	0.005	0.005	0.091	0.004
	3	0.011	3	0.015	0.015	0.043	0.017
40 Чукотка		Интервал 1 1969–1980 11 лет		Интервал 2 1980–2015 35 лет			
	1	0.008	5	0.024	0.024	2.080	0.013
	2	0.003	3	0.010	0.010	0.008	0.009
	3	0.011	4	0.025	0.025	0.822	0.016
35 Яно-Индигир- ская низменность		Интервал 1 1976–1999 23 года		Интервал 2 1999–2021 22 года			
	2	0.019	2	0.018	0.018	0.809	0.010
	3	0.006	6	0.006	0.006	27.063	0.035
	4	0.008	8	0.007	0.007	52.984	0.061

где t_1, t_2 – длительности соответственно 1-го и 2-го временных интервалов, k_1, k_2 – общее число поражений модельных сооружений хотя бы одним очагом в выборках для соответствующего временного интервала (частота поражений), n_1 – объем выборки для первого временного интервала;

4) вычисление расчетной вероятности наблюдаемого числа поражений хотя бы одним очагом k_2 на 2-м временном интервале по данным 1-го интервала на основе использования распределения Пуассона:

$$P(k_2) = 1 - e^{-\theta_2}. \quad (4)$$

5) сопоставление расчетной вероятности поражения линейного сооружения на втором временном интервале с частотой поражения k_2 по критерию хи-квадрат [3]. Согласно использованной схеме, фактическое значение критерия сравнивалось с критическим хи-квадрат при одной степени свободы (3.841).

Также было выполнено сравнение расчетной вероятности поражения линейного сооружения на втором временном интервале с фактической частотой (эмпирической вероятностью) поражения; последняя, в нашем случае, поскольку не наблюдалось случаев нескольких поражений одного сооружения, равна среднему числу поражений.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Исследования, выполненные по изложенной методике, позволили получить следующие результаты. Средняя плотность числа поражений на разных участках колеблется 0.00026 год^{-1} до 0.00104 год^{-1} , при этом четкой тенденции изменения во времени не наблюдается. Только на Яно-Индибирской низменности наблюдается резкое превышение за последние 22 года средней плотности поражения над типичными значениями до величин 0.00159 и 0.00277 год^{-1} .

Как показывает анализ, вероятность поражения линейных сооружений значимо (на уровне 0.95) изменилось на участке 35 (Яно-Индибирская низменность); это подтверждает значение критерия хи-квадрат (табл. 2). Вероятность поражения на временном интервале 2013–2021, рассчитанная как продолжение хода процесса на предыдущем временном интервале 1, много меньше фактической частоты поражения. Иначе говоря, вероятность поражения увеличилась по полученным оценкам в 6–9 раз. Такая ситуация наблюдается при длинах линейных сооружений 3–4 км.

В то же время на большей части ключевых участков отсутствует значимое (на уровне 0.95) изменение вероятности поражения. Это показы-

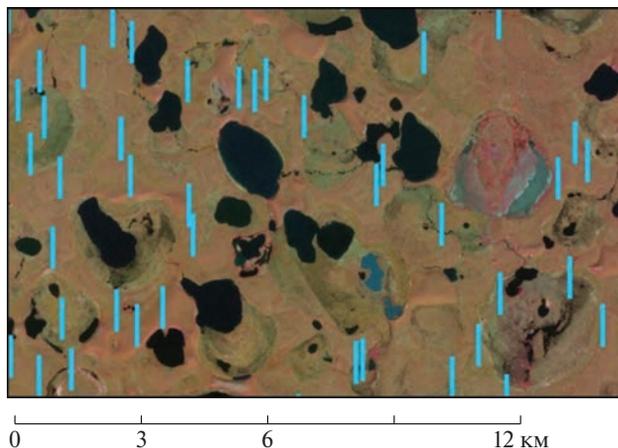


Рис. 3. Пример расположения модельных линейных сооружений на ключевом участке.

вают значения критерия хи-квадрат и прямое сравнение значений фактических частот и расчетных вероятностей (см. табл. 2). Кроме того, отличия расчетной вероятности на втором интервале и фактической частоты могут иметь как положительные, так и отрицательные значения.

ВЫВОДЫ

1. По количественным экспериментальным данным, на базе модельных линейных сооружений, наблюдается дифференцированное по участкам изменение риска поражений линейных сооружений в пределах эрозионно-термокарстовых равнин за последние несколько десятков лет (46–56 лет).

2. На значительной части участков развития эрозионно-термокарстовых равнин риски изменились незначительно, несмотря на идущие климатические изменения.

3. В то же время на отдельных участках эрозионно-термокарстовых равнин вероятность поражения линейных сооружений демонстрирует многократное увеличение (в 6–9 раз для модельных сооружений рассмотренных длин), выходя за пределы случайных изменений.

Исследование выполнено при поддержке гранта РФФ № 18-17-00226П.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Викторов А.С., Трапезникова О.Н., Орлов Т.В., Садков С.А. Использование подходов математической морфологии ландшафта при дистанционной оценке природных опасностей // Геоэкология. 2019. № 5. С. 61–73.
2. Елкин В.А. Региональная оценка карстовой опасности и риска (на примере Республики Татарстан):

- автореф. дисс. ... канд. геол.-мин. наук. 2004. М.: ИГЭ РАН. 24 с.
3. Крамер. Г. Математические методы статистики. М.: Мир, 1970. 648 с.
 4. Осипов В.И. Природные опасности и стратегические риски в мире и в России // Экология и жизнь. 2009. Вып. 11–12 (96–97). С. 5–15.
 5. Оценка и управление природными рисками: Матер. Всерос. конф. “РИСК-2003”, Т. 1. М.: РУДН, 2003. 412 с.
 6. Оценка и управление природными рисками. Тематический том 6 / Под ред. А.Л. Рагозина. М.: Изд. фирма “КРУК”, 2003. 320 с.
 7. Рагозин А.Л. Основные положения теории опасных геологических процессов и рисков // Новые идеи в науках о земле: тез. докл. III междунар. конф. М., 1997. Т. 4. 115 с.
 8. Victorov A., Orlov T., Trapeznikova O. The morphological pattern development of thermokarst plains with fluvial erosion: stochastic modeling for risk assessment // Int. Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 2019. 2019. V. 19. Is. 1.2. P. 531–541.
 9. Victorov A.S., Orlov T.V., Trapeznikova O.N., Kapralova V.N., Arkhipova M.V. Regularities of the distribution of lake areas on thermokarst plains with fluvial erosion // Doklady Earth Sciences. 2020. T. 491. № 2. С. 282–284.

EVALUATION OF NATURAL RISK CHANGES WITHIN EROSIONAL THERMOKARST PLAINS UNDER THE IMPACT OF CLIMATIC TRENDS

A. S. Viktorov^{a,#}, V. N. Kapralova^a, M. V. Arkhipova^a, and T. V. Orlov^a

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

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

The relevance of assessing risk to engineering structures from geohazards is determined by changing natural conditions in the permafrost zone. Risk assessment by statistical methods directly is accompanied by certain difficulties. Accumulation of statistics requires a significant amount of time, and this time is often comparable to the time of engineering structure operation. The most difficult stage of risk assessment is the assessment of the probability of damage to engineering structures caused by a hazardous geological process. The aim of the study was to substantiate the method for solving this problem on the territory of thermokarst plains with fluvial erosion for linear engineering structures using the methods of mathematical landscape morphology. Mathematical landscape morphology allows us to proceed to the quantitative risk assessment. The first step of applying methods of mathematical landscape morphology is to divide the area into homogenous by the process development sections. The method is based on the model that was proposed by the authors for the development of the morphological structure of thermokarst plains with fluvial erosion under conditions of an asynchronous start, which is realized according to empirical verification in most of cases. The model of risk assessment was applied to 4 key areas located under different physico-geographical conditions, but having morphological homogeneity. Using satellite images of different periods, the delineation of thermokarst lakes and khasyreys was carried out. The average density of the number of lesions in different areas varies from 0.00026 year⁻¹ to 0.00104 year⁻¹, and there is no clear trend of change with time. According to quantitative experimental data, there has been a site-differentiated change in the risk of damage to linear structures within the thermokarst plains with fluvial erosion over the past few decades (46–56 years). The probability of damage to linear engineering structures has changed significantly in plot 35 (Yano-Indigirskaya lowland), which confirms the chi-square test. The probability of defeat increased by 6–9 times according to the estimates obtained. This situation is observed when the lengths of linear structures are 3–4 km. However, in most of the key areas, there is no significant change in the probability of damage, despite ongoing climate change.

Keywords: *cryolithozone, thermokarst, mathematical model, morphological structure, geological hazards, risk assessment*

REFERENCES

1. Victorov, A.S., Trapeznikova, O.N., Orlov, T.V., Sadkov, S.A. *Ispol'zovanie podkhodov matematicheskoi morfologii landshafta pri distantsionnoi otsenke prirodnykh opasnostei* [Application of mathematical morphology of landscapes approach to remote estimation of natural hazards]. *Geoekologiya*, 2019, no. 5, pp. 61–73. (in Russian)
2. Elkin, V.A. *Regional'naya otsenka karstovoi opasnosti i riska (na primere Respubliki Tatarstan)* [Regional assessment of karst hazard and risk (by the example of the Republic of Tatarstan)]. Extended abstract of Cand. Sci. (Geol.-Min.) dissertation. Moscow, IEG RAS. 2004, 24 p. (in Russian)
3. Kramer, G. *Matematicheskie metody statistiki* [Mathematical methods in statistics]. Moscow, Mir Publ., 1970, 648 p. (in Russian).
4. Osipov, V.I. *Prirodnye opasnosti i strategicheskie riski v mire i v Rossii* [Natural hazards and strategic risks in the

- world and in Russia]. *Ekologiya i zhizn'*, 2009, vol. 11–12 (96–97), pp. 5–15. (in Russian)
5. *Otsenka i upravlenie prirodnyimi riskami* [Assessment and management of natural risks]. *Mater. Vseros. konf. "Risk-2003"* [Proc. All-Russia Conf. Risk-2003], Moscow, RUDN Publ., 2003, vol. 1, 412 p. (in Russian)
 6. *Otsenka i upravlenie prirodnyimi riskami* [Assessment and management of natural risks]. A.L. Ragozin, Ed. Moscow, "KRUK" Publ., 2003, 320 p. (in Russian)
 7. Ragozin, A.L. *Osnovnye položeniya teorii opasnykh geologicheskikh protsessov i riskov* [Principal statements of the theory on geological hazards and risks]. *Novye idei v nauках o Zemle. Tez. dokl. III Mezhd. konf.* [New ideas in the Earth sciences. Proc. 3rd Intern. Conf.] Moscow, 1997, vol. 4, p. 115. (in Russian)
 8. Victorov, A., Orlov, T., Kapralova, V., Trapeznikova, O. The morphological pattern development of thermokarst plains with fluvial erosion: stochastic modeling for risk assessment. In: International multidisciplinary scientific GeoConference "Surveying, Geology and Mining, Ecology, Management" SGEM-2019. 2019, vol. 19, issue 1.2, pp. 531–541.
 9. Victorov, A.S., Orlov, T.V., Trapeznikova, O.N., Kapralova, V.N., Arkhipova, M.V. Regularities of the distribution of lake areas on thermokarst plains with fluvial erosion, *Doklady Earth Sciences*. 2020, vol. 491, no. 2, pp. 282–284.

ЗАГРЯЗНЕНИЕ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

УДК 627.157: 002.637 (282.247.41)

МОНИТОРИНГ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ТЯЖЕЛЫМИ МЕТАЛЛАМИ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ ВЕРХНЕЙ ВОЛГИ

© 2023 г. Г. Ю. Толкачев^{1,*}, Б. И. Корженевский^{1,**}, Н. В. Коломийцев^{1,***}

¹ФГБНУ “Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники и мелиорации имени А.Н. Костякова”,
ул. Большая Академическая, 44, к. 2, Москва, 127434 Россия

*E-mail: k-26@yandex.ru

**E-mail: 542609@list.ru

***E-mail: kolomiytsev@vniigim.ru

Поступила в редакцию 23.01.2023 г.

После доработки 23.03.2023 г.

Принята к публикации 28.03.2023 г.

Проблема загрязнения водных объектов тяжелыми металлами продолжает оставаться актуальной. Наиболее опасными загрязняющими веществами донных отложений являются металлы Hg, Cd, Zn, Pb, Cu, Cr, Co, Ni, Fe, Mn и As. Для систематизации исследований осуществлено ранжирование объектов, существенно различающихся по площадям, техногенным воздействиям и ландшафтным характеристикам. Объектом I ранга является чаша водохранилища с прилегающей к ней приводо-раздельной территорией с расположенными на ней городами и поселками, различными притоками, более мелкими элементами природного и природно-техногенного рельефа. Меньшими по площади, но не по роли в загрязнении водных объектов являются городские и поселковые агломерации, расположенные на побережьях водохранилищ и незарегулированных участках, на приводораздельных территориях. Определенную лепту в загрязнение/очистку приносят малые реки, которые могут способствовать поступлению как чистого, так и загрязненного иловатого материала в большие водотоки. Для различных по иерархии таксонов предлагаются различные площадные и временные режимы обследований. В представленной работе на основании экспериментальных исследований дана оценка загрязнения тяжелыми металлами донных отложений в пределах Верхневолжской системы: оз. Селигер, Ивановское и Угличское водохранилища и участок Верхней Волги. Приводятся полученные на практике результаты исследований содержания (загрязнения) элементов – Cr, Co, Ni, Zn, Cd, Pb, As, Fe и Mn. Описаны или представлены ссылки на методики, использовавшиеся при проведении экспериментов. Представлена общая картина загрязнения и отмечены тенденции ее изменения в пространстве и во времени.

Ключевые слова: мониторинг, тяжелые металлы, загрязнение, таксоны, участки категорий, донные отложения, водные объекты

DOI: 10.31857/S0869780923030116, **EDN:** WNKUCO

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Режимные наблюдения за состоянием донных отложений (ДО) водных объектов – необходимый элемент изучения их экологического состояния, поскольку сами отложения аккумулируют и трансформируют техногенное воздействие [25, 33], являясь при этом индикатором его уровня [8, 15, 28]. Наличие тяжелых металлов (ТМ) в ДО определяется гидродинамическими характеристиками потока [12], физико-химическими процессами, связанными с ТМ, а также их взаимодействием с квазистационарной сорбирующей фазой [1, 2, 4, 5]. Оценка различий проб ДО по

гранулометрическому составу – главный принцип, который позволяет оптимизировать число проб в соответствии с гидрологическими характеристиками объекта. Исследованы участки трех категорий, ранжированные по природно-техногенным признакам, участки IV категории используются для специальных наблюдений [22].

К участкам I категории относятся чаши водохранилищ с сопредельными склонами, на которых расположены промышленные и селитебные зоны, сельхозугодья и прочие техногенные объекты. Само водохранилище характеризуется промывным режимом ниже водопропускных соору-

жений вышерасположенного гидроузла, режимом транзита и локального накопления ТМ в средней части и мощной седиментационной зоной ТМ в приплотинной части. Их минимальное количество откладывается на некотором расстоянии от дамбы сопредельного водохранилища, с постепенным увеличением до сплошного распространения в верхнем бьефе исследуемого водохранилища. Города, промзоны и притоки являются важными факторами как привноса загрязнителей, так и разбавления загрязненных отложений более чистыми наносами. Режим наблюдений для всей чаши водохранилища целесообразно повторять один раз в 5–10 лет при оценке общих тенденций его загрязнения [22]. При рекогносцировочных работах целесообразно опробовать несколько точек по различным наиболее типовым створам. Повторные обследования следует производить с учетом полученных ранее результатов.

На сопредельных городским и поселковым агломерациям территориях (участки II категории) производятся обследования по створам как выше, так ниже агломераций для определения их участия в загрязнении/очищении ДО водного объекта. Эти исследования способствуют пониманию результатов применения природоохранных мероприятий. Повторяемость наблюдений может составлять 2–4 года, в зависимости от динамики загрязнения/очищения ДО.

Малые реки (участки III категории) – более уязвимые водные объекты к поступающим в них загрязнениям [9]. В исключительных случаях, условно чистые наносы таких рек, поступающие в водоприемник, улучшают геоэкологическую ситуацию в последнем. В условно чистых малых реках при отсутствии активной техногенной нагрузки повторение обследований осуществляется один раз в 5–10 лет [19, 21]. В случаях, когда малые реки являются активными аккумуляторами загрязнителей техногенного генезиса, такие участки с промышленными зонами необходимо относить к IV категории.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

При выборе пунктов отбора ДО использованы следующие принципы. Отбор ДО осуществляется на тех участках, где возможно наличие ДО со значительным содержанием иловой фракции. Такие места именуются седиментационными ловушками, так как они энергетически наиболее выгодны для накопления мигрирующих ТМ. Оценка гранулометрического состава отложений, в первую очередь, для отобранных в различных местах водоема, крайне важна, поскольку он определяет, как сорбционную способность отложений, так и их гидрофильность, ионный обмен и другие характеристики. Последние наиболее свойственны глинистым отложениям [13, 18].

Отбор проб ДО осуществлялся из приповерхностного слоя. При использовании методики, описанной в [28, 37, 38], достаточным для исследования считается образец весом около 0.5 кг, из которого впоследствии выделяется “сорбирующая фракция” размером менее 0.020 мм методом мокрого просеивания [34, 38]. Согласно методике, полученный материал выпаривается и высушивается до воздушно-сухого состояния в сушильных шкафах при температуре не выше +60°C [28, 37]. Определение концентраций ТМ в пробах ДО проводится методом ИСП, а для кадмия методом атомной адсорбции после разложения пробы в “царской водке” [28]. Подобная методика используется в ряде стран, например, в Чехии [35].

Проведены исследования ряда объектов Верхней Волги: от оз. Селигер до нижнего бьефа Угличского водохранилища. Озеро Селигер является естественным регулятором стока Верхней Волги от истоков до Ивановского водохранилища. В г. Селижарово воды Селигера впадают в Волгу, и далее до с. Городня находится незарегулированный участок реки, который переходит в Ивановское водохранилище. В свою очередь Ивановское водохранилище переходит в Угличское. Таким образом, рассматривается единая водная система.

В работе приведены уровни содержания в ДО Cr, Co, Ni, Zn, Cd, Pb, As, а также Fe и Mn. Уровень аккумуляции ТМ в ДО оценивался с помощью “индекса геоаккумуляции” [37], который характеризует относительную кратность загрязнения ДО относительно природного фона во фракциях ДО менее 0.020 мм. Геохимическая фоновая концентрация элемента принималась по [3, 40]. Уровни загрязнения ДО подразделяются на классы качества по каждому ТМ и мышьяку, когда фоновое значение выбирается с полутора-кратным запасом (в сторону увеличения) [36]. На основании классификации [37] при необходимости возможно предоставление информации о загрязнении ДО в виде карт-схем, таблиц, графиков по интересующим элементам.

В процессе исследований наибольшее внимание уделялось изучению ДО Ивановского водохранилища – важного и предположительно наиболее загрязненного из перечисленных объектов. При изучении распределения элементов по формам их нахождения в ДО особое внимание уделялось фракциям, на которые могут повлиять различные условия окружающей среды, для чего использовался метод А. Тессье [39]. Использование последовательных экстракций дает детальную информацию о происхождении, биологической и физико-химической доступности, мобилизации и миграции микроэлементов.

Экстракция 1 – ТМ в обменном комплексе. Адсорбция/десорбция элементов на основных компонентах ДО (глинах, гидратированных оксидах железа и марганца, гуминовых кислотах) зависит от изменения ионного состава воды в водных объектах.

Экстракция 2 – ТМ, связанные с карбонатами. Значительные количества металлов могут быть связаны с карбонатными формами донного осадка; эта фракция очень восприимчива к изменению рН.

Экстракция 3 – ТМ, связанные с оксидами железа и марганца. Окси-гидроксиды железа и марганца существуют в виде конкреций, цементных образований в твердой фазе осадка или просто в виде покрытия на ее частицах. Они являются поглотителями микроэлементов и термодинамически нестабильны в анаэробных условиях – при низком Eh.

Экстракция 4 – ТМ, сорбированные органическим веществом ДО. ТМ связаны с различными формами органического вещества: живыми организмами, детритом, покрытиями на минеральных частицах. В условиях окисления в природных водах органическое вещество может разлагаться, что приводит к выделению растворимых микроэлементов.

Определение концентраций элементов в исследуемых образцах осуществлялось на атомно-абсорбционном спектрометре “КВАНТ – Z.ЭТА-Т” (НПО “КОРТЭК”, г. Москва).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Озеро Селигер. В Селигер впадает более 100 малых рек и ручьев. Чаша озера и сопредельные приводораздельные территории отнесены к участку I категории. Город Осташков, согласно приведенным выше принципам районирования, отнесен к участку II категории. Более мелкие таксоны (участки III и IV категории) не обследовались. Важным элементом территории являются болота, которые служат источниками поступления соединений марганца и железа в чашу озера [14, 23, 27].

Пункты отбора ДО – территории озера от пос. Осцы в южной его части до пос. Залучье и руч. Ускоройня на севере. Особое внимание уделено г. Осташков, где с интервалом в 4 года опробовались ДО значительной части озера. Основные результаты приведены в [20]. В каждом образце были определены: Cd, Hg, Pb, Zn – элементы первого класса опасности; Cu, Ni, Cr, Co, Mo – элементы второго класса опасности; V, W и Mn – элементы третьего класса опасности [24].

Наибольшим загрязнителем из ТМ в ДО оз. Селигер является Cr, шлейф от которого отмечается на расстоянии более 10 км от источника за-

грязнения – заводов г. Осташков [10]. Концентрации хрома в ДО достигают наиболее высоких значений 5–6-го Igeo-классов¹ в Городском плесе. Содержание прочих ТМ не превышает 1–2-го Igeo-классов и вызвано, наряду с влиянием предприятий, также некорректным отношением к геоэкологической ситуации в пределах рекреационных и селитебных территорий. Снижение загрязнения Cr в течение десятилетий не исключено при ослаблении существующего антропогенного и техногенного воздействия на экосистему оз. Селигер, соблюдении норм в отношении обращения со стоками и разбавлении концентрации данного ТМ абрадируемыми отложениями.

Перераспределение ТМ в ДО изученного водного объекта обусловлено динамикой водной толщи. Лопастная конфигурация озера предопределяет специфику ветровых течений [32]. Численное моделирование указывает на наличие десятков зон стоково-ветрового характера протяженностью до нескольких километров [26, 31]. Ветры западных румбов определяют в Городском плесе соответствующие течения, которые обуславливают перераспределение хрома в ДО от техногенного источника на значительной площади дна озера. Юго-западные ветры определяют значимую циркуляционную зону, способствуя загрязнению Cr ДО на весьма больших расстояниях от промзоны. Видимой связи между распространением других ТМ и ветровыми течениями (по [31]) не прослеживается вследствие многочисленности их источников, а также их невысоких концентраций (до умеренного загрязнения). Впоследствии большая часть этих ТМ концентрируется в ДО, увеличивая их загрязненность. В районе г. Осташков в двух точках отмечено умеренное загрязнение свинцом, а в одной точке среднее. Также отмечено умеренное загрязнение цинком, остальные ТМ находятся на уровне фоновых или близких к фоновым значениям. Специфическое загрязнение связано с работой таких предприятий, как завод “Луч”, Кожевенный завод и завод “Звезда” [10]. По данным проведенных исследований за период наблюдений ни ухудшения, ни улучшения экологической ситуации не отмечено.

Верхняя Волга. На берегах Верхней Волги от истока до Ивановского водохранилища расположены: города Тверь, Ржев, Zubцов, Торжок, Старица, поселки городского типа и т.д. Продолжают действовать такие отрасли промышленности, как деревообработка, целлюлозно-бумажная, домостроительная, энергетическая, пищевая, торфодобыча [10]. Сточные воды этих предприя-

¹ Igeo – индекс геоаккумуляции; при расчете учитывают концентрации ТМ в ДО тонкозернистых фракций (<20 мкм) (С) и геохимические фоновые значения (Сф) в иловых или глинистых отложениях.

Таблица 1. Соотношение взвешенных и растворенных форм ТМ в водах на речном участке Верхней Волги и в Ивановском водохранилище

	Ржев	Торжок	Тверь	Эммаус	Городня	Слобода	Шош. плес	Свердлово	Приплотинный участок	
									лето	весна
Cr	11.00	1.20	12.7	0.10	0.20	3.40	4.40	0.60	0.18	0.12
Cd	3.40	1.70	7.00	0.50	0.80	—	—	10.90	0.90	0.48
Cu	0.50	0.14	0.40	0.51	0.55	0.05	0.06	0.31	0.40	0.20
Co	2.10	1.00	0.40	0.40	0.28	0.27	0.05	0.16	0.30	0.26
Pb	2.40	2.70	2.90	0.60	1.00	0.35	0.06	1.00	0.88	0.53
Mn	1.30	4.30	6.60	0.03	0.61	3.20	16.50	7.90	0.11	0.10
Fe	0.26	0.27	0.40	0.04	0.05	0.26	0.05	0.27	0.03	—
Ni	35.00	1.60	12.80	0.27	0.60	1.60	1.20	0.23	0.54	0.40
Zn	1.25	1.12	0.40	0.47	0.16	0.37	1.24	0.21	0.32	0.15
Ti	9.70	1.60	9.20	3.80	—	—	—	2.10	2.40	1.90

Таблица 2. Уровни загрязнения ДО Верхней Волги по Igeo-классам

Место отбора проб	Hg	Cu	Zn	Ni	Co	Pb	Cr	Mn	As	Cd
р. Малая Коша	фон	1	0	1	1	1	0	1	1	фон
4 км выше г. Ржев	фон	0	0	0	0	0	0	2	1	0
г. Ржев мост	1	1	0	0	0	2	0	0	0	0
5 км ниже г. Зубцов	0	0	фон	0	0	0	0	0	0	0
Устье р. Вазуза	0	0	0	0	0	3	0	1	1	0
г. Старица мост	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0
6 км ниже г. Старица	фон	0	0	0	0	0	0	1	0	0
мкр. Мигалово выше г. Тверь	фон	0	фон	0	0	фон	0	фон	0	0
Ниже г. Тверь	1	2	2	1	0	1	1	фон	1	фон
Устье р. Тверца	фон	1	1	0	0	1	1	2	1	2
р. Городня	1	1	1	0	0	0	0	фон	0	фон

тий, содержащие ТМ, попадая в водный объект, как в виде растворов, так и в виде взвесей, способствуют накоплению ТМ в ДО, формируя потоки рассеяния. Уменьшение скорости течения в водохранилище приводит к осаждению тонких и мелких фракций наносов [6, 7, 11].

На речном участке Верхней Волги металлы Cr, Ni, Pb, Co, Cd, Zn и Mn мигрируют преимущественно в виде взвеси, а Cu и Fe преимущественно в растворенной форме. В водохранилище содержание взвешенных форм в летний период существенно превышает их содержание в весенний период. В результате процессов осаждения взвеси равновесие в водной массе резко сдвигается в сто-

рону растворенных форм ТМ, прежде всего для свинца, хрома, кадмия и никеля (табл. 1).

Изучение состава ДО Верхней Волги осуществлялось от истока Волги до Ивановского водохранилища. В качестве фоновых объектов использовались ДО озер Волго и Пено. Наибольшее загрязнение ДО отмечено в устьях рек Тверца и Вазуза. Часто встречающиеся металлы ниже г. Тверь — медь, цинк, ртуть, никель, свинец, хром и мышьяк (табл. 2).

Оценка форм нахождения некоторых ТМ в ДО фонового участка и участка ниже г. Тверь показала, что такие элементы, как Fe, Cu, Zn связаны с гидроксидами Fe и Mn, а также находятся в кристаллической решетке твердой фазы отложений

Таблица 3. Распределение ТМ и мышьяка по формам нахождения в ДО Иваньковского водохранилища, мг/кг

Точка отбора	As	Cd	Se	Pb	Zn	Co	Ni	Cu	Cr	Sb
Сорбированные в обменном комплексе										
33	0.6	1	0.012	29.8	14	0.10	23.8	33.8	0.8	1.16
34	1	0.6	0.020	21.8	10	0.08	21.8	35.8	0.5	0.82
37	0.6	0.6	0.012	16	6	0.06	20	41.8	0.1	0.5
35	0.2	1	0.004	6	6	0.02	23.8	51.8	0.7	0.5
40	1	0.8	0.020	24	12	0.08	22	26	0.6	1
41	1.4	0.2	0.028	22	10	0.08	28	22	0.4	0.84
45	0.2	0.2	0.004	14	8	0.04	28	28	0.4	0.66
48	0.4	0.2	0.008	12	6	0.04	23.8	49.8	0.4	0.5
Сорбированные на карбонатах										
33	–	0.38	0.002	6.0	1.8	1.68	39.6	19.8	–	–
34	–	1.18	–	–	–	1.02	43.8	6.0	–	–
37	–	1.0	–	–	–	0.04	41.8	12.2	–	–
35	0.8	0.8	0.03	23.8	–	1.48	44.0	2.0	–	–
40	–	0.2	0.014	–	–	1.02	40.0	32.0	–	–
41	–	0.4	–	–	–	0.72	49.6	–	–	–
45	–	1.2	0.002	–	–	0.76	34.2	26.2	–	–
48	–	1.6	–	–	2.0	0.36	37.8	–	–	–
Сорбированные на гидроксидах железа и марганца										
33	0.84	–	0.022	46.4	48.6	0.28	1.0	21.6	4.04	1.90
34	1.16	–	0.034	55.6	43.8	0.78	–	37.2	3.54	1.74
37	0.48	0.20	0.016	84.8	55.2	2.42	11.4	28.8	4.50	2.40
35	–	0.72	–	60.2	37.2	0.76	0.6	55.0	2.54	1.56
40	–	1.88	–	47.8	20.4	0.7	–	17.4	1.82	0.54
41	–	–	–	10.4	18.8	–	–	102.4	1.76	0.52
45	0.52	–	0.012	25.4	9.8	0.38	–	20.8	0.94	0.22
48	–	–	–	31.0	9.8	0.68	2.8	36.0	0.94	0.34

(глинистая фракция ДО представлена смектитом, каолинитом, иллитом и хлоритом [18]). На участке, где в ДО прослеживается шлейф загрязняющих ТМ от г. Тверь, поступающих со сточными водами и поверхностным стоком, вышеуказанные элементы находятся в подвижных формах. Переход этих элементов из ДО в водную толщу не исключен, но их малое количество определяет их как малозначимый источник вторичного загрязнения. Исходя из полученных данных, целесообразно отнести Верхнюю Волгу от г. Селижаров до г. Тверь к участку III категории мониторинга, а г. Тверь – как промышленно-селитебную зону и источник диффузного загрязнения – к участку II категории мониторинга с повторением наблюдений каждые 5 лет.

Иваньковское водохранилище. Иваньковское водохранилище используется как для регулирования стока р. Волги, так и водоснабжения

г. Москва, его площадь составляет 327 км², а площадь водосбора 4100 км² [16]. Распределение содержания исследуемых ТМ по формам нахождения в изученных районах водохранилища приведено в табл. 3. Точки отбора № 35, 34, 33 расположены на Волжском плесе напротив с. Гордня, д. Мелково и д. Плоски – сверху вниз по течению. Точка № 37 расположена в Шошинском плесе между автомастами; точки 40, 41, 45, 48 – напротив урочища (ур.) Корчева, о. Уходово, Коровинского залива и входа в канал им. Москвы соответственно [30].

Из данных табл. 3 следует, что одна из основных форм As – сорбированная в обменном комплексе, как правило – в ДО Иваньковского плеса. В ДО Волжского и Шошинского плесов, а также в районе Коровинского залива значительная часть As сорбирована на гидроксидах Fe и Mn. В начале Иваньковского водохранилища, в районе с. Го-

Таблица 4. Суммарное содержание подвижных форм тяжелых металлов и мышьяка (числитель, мг/кг) и их значения в Igeo-классах (знаменатель) в пунктах отбора проб

Точка отбора	As	Cd	Pb	Zn	Cu	Cr	Co	Ni
33	1.44/ф	1.38/2	82.2/2	64.4/ф	75.2/1	4.84/ф	2.06/ф	64.4/ф
34	2.16/ф	1.78/2	77.4/2	53.8/ф	79.0/1	4.04/ф	1.88/ф	65.6/ф
37	1.60/ф	1.80/2	100.8/2	61.2/ф	82.8/1	4.60/ф	2.52/ф	73.2/0
35	1.00/ф	2.52/3	90.0/2	43.2/ф	108.8/1	3.24/ф	2.26/ф	68.4/0
40	1.28/ф	2.88/3	71.8/2	32.4/ф	75.4/1	2.42/ф	1.80/ф	62.0/ф
41	1.40/ф	0.96/2	32.2/1	28.8/ф	124.4/1	2.16/ф	0.80/ф	77.6/0
45	0.72/ф	1.40/2	39.4/1	17.8/ф	75.0/1	1.34/ф	1.18/ф	62.2/ф
48	0.40/ф	1.80/2	43.0/1	17.8/ф	85.8/1	1.34/ф	1.08/ф	64.4/ф

родня, подавляющая часть As (80%) представлена формой, сорбированной на карбонатах, что может в частности объясняться активным смывом почв с левого берега и их последующим отложением.

Что касается Cd, его “обменная” составляющая снижается вниз по течению, от начала к концу водохранилища, в то же время “карбонатная” форма в районе дамбы становится превалирующей. В районе ур. Корчева более 60% Cd находятся в сорбированной форме на гидроксидах железа и марганца, что может объясняться привнесом этих элементов с болотистых берегов. Металлы Pb и Zn также связаны с “гидроксидными” формами железа и марганца на значительной площади водохранилища, за исключением участка от островов Клиницы и Уходово до Коровинского залива, на котором от 40 до 60% представлены их ионообменными формами.

Основная форма существования в ДО Co и Ni – “карбонатная”, составляет для Co до 80–90% и для Ni 50–60%, за исключением Шошинского плеса и входа в канал им. Москвы, где формы Co и Ni, связанные с гидроксидами, составляют 90% для первого и 60% для второго. Вторая определяющая форма для Ni – “обменная”. Таким образом, подвижная форма Ni практически целиком находится в доступной фазе, наиболее подверженной распаду с последующим выходом (иммобилизацией) металла в водную массу при изменении гидрохимических окислительно-восстановительных условий.

Содержание Cu в большинстве исследованных районов также находится в основном в “обменной” и “карбонатной” формах, но около 30–40% – в “гидроксидной”. Только в районе о. Уходово “гидроксидная” форма составляет 80% всей суммы подвижных соединений. Также на гидроксидах железа и марганца сорбировано 70–90% содержания подвижного Cr.

Для оценки потенциального вторичного загрязнения рассчитаны суммы подвижных соеди-

нений микроэлементов, исходя из возможности их полного выхода из донных отложений, и оценены по системе Igeo-классов; значения приведены в табл. 4.

Наибольший уровень загрязнения ДО отмечен для Cd (3 Igeo-класс) в районе с. Городня на входе в водохранилище и в Ивановском плесе напротив ур. Корчева. В других изученных районах суммарное содержание Cd в подвижных формах ДО соответствует 2 Igeo-классу. Согласно классификации [37], 3-й Igeo-класс соответствует среднезагрязненному уровню, 2-й Igeo-класс – умеренно загрязненному уровню. Согласно классификации [19], оба эти класса соответствуют умеренной (умеренно опасной) техногенной нагрузке.

Содержание Pb от с. Городня до ур. Корчева соответствует уровню 2-го Igeo-класса. Далее по течению вплоть до канала им. Москвы содержание Pb снижается до 1-го Igeo-класса, что соответствует “незагрязненному до умеренно загрязненного” уровню загрязнения и слабой (малоопасной) техногенной нагрузке. Содержание Cu по всей площади водохранилища находится на уровне 1-го Igeo-класса. Содержания всех остальных изученных элементов либо в пределах фона, либо не превышают нулевой Igeo-класс (незагрязненный уровень).

Промышленно-селитебной зоной на берегу водохранилища является г. Конаково. В ДО напротив города (под ЛЭП) вблизи правого берега, среднезагрязненному уровню, или 2-му Igeo-классу, соответствует только содержание Zn. Содержания Cr и Pb находятся на уровне 1-го Igeo-класса, содержание остальных элементов – на фоновом либо незагрязненном уровне.

В предыдущих исследованиях [29] был сделан вывод, что именно изменение содержания ТМ в подвижных формах способствует изменению их валового содержания в ДО. Возможный вынос элементов из ДО не будет превышать их суммарные концентрации в подвижных соединениях. Исходя из полученных данных, потенциальный

вынос исследуемых ТМ из отложений не является значительным, и о серьезной опасности вторичного загрязнения говорить не приходится. Все пункты отбора проб на формы существования ТМ в ДО относятся к I категории. Поскольку уровни загрязнения металлами и их потенциальный вынос не значительны, целесообразно повторять исследования один раз в 5–10 лет. Район отбора проб ДО в районе г. Конаково следует отнести к II категории. При изучении внутригодовой динамики подвижных форм ТМ (как и точки отбора в районе д. Плоски и на Шошинском плесе [29]) данный район следует отнести к участкам IV категории.

Угличское водохранилище. Водоохранилище относится к участку I категории. В ходе первичных исследований было отобрано 30 проб ДО, из которых 6 – в верхнем бьефе плотины, и 9 проб ДО на основных притоках. При повторных работах, спустя пять лет, отобраны 25 проб, из которых 4 – в верхнем бьефе плотины. Максимальная плотность отбора проб ДО была вблизи городов: Дубна, Кимры, Белый Городок, Калязин, Кашин.

Основными загрязнителями ДО водного объекта являются Cd, Zn и Hg. Отмечено, что содержание Zn в последние годы на всей территории уменьшилось по сравнению с началом 2000-х гг. [17], в то время как содержание Cd увеличилось. Наибольшее загрязнение ТМ и мышьяком ДО отмечено на участке между г. Дубна и г. Белый Городок. Значение загрязнений для Zn – 1–3-й Igeo-классы, для Hg – 2-й Igeo-класс и для As – 1-й Igeo-класс. В последние годы отмечается постепенное снижение концентраций Hg и As вниз по течению от Дубны до Углича. В верхнем бьефе плотины содержание металлов и мышьяка в ДО не превышает фоновые значения. В начале века наблюдалась разнородная картина распространения ТМ и мышьяка по пунктам опробования. В настоящее время она существенно изменилась за счет перераспределения ДО по площади водохранилища и выглядит более однородной. Для ДО водохранилища характерно повсеместное повышенное содержание Mn, которое можно соотнести с 1-м и 2-м Igeo-классами. В целом содержание ТМ и As в ДО водохранилища оценивается как допустимое.

ВЫВОДЫ

1. Наибольшим загрязнителем ДО оз. Селигер является Cr, шлейф от которого продолжает отмечаться на расстоянии более 10 км от источника загрязнения. Содержание хрома в ДО достигает наиболее высоких значений (5–6 Igeo-классы) в Городском плесе. Другие изученные ТМ в ДО озера не являются опасными при существующей геоэкологической ситуации.

2. Снижение загрязнения Cr в течение десятилетий не исключено при ослаблении существующего антропогенного и техногенного воздействия на экосистему оз. Селигер, соблюдении норм в отношении обращения со стоками и разбавлении концентрации данного ТМ абрадированными отложениями.

3. Соотношения взвешенных и растворенных форм ТМ в Верхней Волге и Иваньковском водохранилище указывают на существенные различия на исследованных участках. На речном участке Cr, Ni, Pb, Co, Cd, Zn и Mn мигрируют преимущественно в виде взвеси, а Cu и Fe преимущественно в растворенной форме. Содержание взвешенных форм в меженный период в водохранилище существенно превышает их содержание в половодье. Осаждение взвеси сдвигает равновесие в сторону растворенных форм ТМ, прежде всего для свинца, хрома, кадмия и никеля.

4. Загрязнение металлами ДО Верхней Волги незначительно превышает фон. Fe, Zn, Cu, Cr связаны с гидроксидами Fe и Mn, а ниже г. Тверь находятся преимущественно в поверхностно-сорбированных формах, что объясняется процессами сорбции ТМ, находящихся в сточных водах. Эти ТМ могут поступать в речную воду, но их незначительное количество ниже города в настоящее время не определяет этот техногенный поток рассеяния элементов в качестве опасного источника вторичного загрязнения водных масс.

5. При изучении ДО Иваньковского водохранилища установлено, что Pb, Zn и Cr находятся в форме, связанной с гидроксидами железа и марганца; Co, Cd, Ni, Cr и Cu находятся в ионообменной и карбонатной формах. Содержание и распределение ТМ по формам существования зависят от меняющегося соотношения приходной и расходной составляющих баланса веществ, гидродинамической обстановки в придонном слое водной толщи, физико-химических условий в верхнем слое ДО.

6. В ДО Иваньковского водохранилища отмечены наибольшие уровни загрязнения суммарными концентрациями подвижных соединений Cd и Pb, которые, однако, не превышают 2-го Igeo-класса, или “умеренно загрязненного” уровня. Возможный вынос металлов из ДО не будет превышать данные концентрации, поэтому о серьезной опасности вторичного загрязнения исследуемыми элементами говорить не приходится.

7. Загрязнение ДО Угличского водохранилища оценено по постоянным пунктам отбора проб в различные годы. Отмечены изменения загрязнения ДО за период наблюдений, во всех точках наблюдается превышение концентраций Cd и Zn над фоновыми значениями. В настоящее время за счет перераспределения ДО по площади водохра-

нилища загрязнение отложений выглядит более однородным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Веницианов Е.В., Салтанкин В.П.* Мониторинг дна // Научные основы создания систем мониторинга качества природных поверхностных вод. М.: Научный мир, 2016. С. 110–132.
2. *Веницианов Е.В.* Некоторые особенности сорбции тяжелых металлов слоем донных осадков и почвогрунтов // Водные ресурсы. 1997. № 3. С. 29–35.
3. *Виноградов А.П.* Геохимия редких и рассеянных элементов в почвах. М.: Изд-во АН СССР, 1957. 235 с.
4. Водохранилище Воткинской ГЭС / Под ред. Ю.М. Матарзина. Пермь: Изд-во Перм. ун-та, 1968. 164 с.
5. *Данилов-Данильян В.И.* Показатели эффективности внедрения концепции по снижению диффузного загрязнения в бассейне Волги в экономической и экологической сферах // Диффузное загрязнение водных объектов: проблемы и решения. М.: Институт водных проблем РАН, 2020. С. 399–405.
6. *Данилов-Данильян В.И.* Национальный приоритетный проект “Оздоровление Волги”: первый шаг к нормализации экологического состояния бассейна великой реки // Научные проблемы оздоровления российских рек и пути их решения: сб. трудов конференции. М.: Студия Ф1, 2019. С. 12–16.
7. *Данилов-Данильян В.И., Полянин В.О., Фащевская Т.Б., Кирпичникова Н.В. и др.* Проблема снижения диффузного загрязнения водных объектов и повышение эффективности водоохраных программ // Водные ресурсы. 2020. Т. 47. № 5. С. 503–514.
8. *Денисова А.И., Нахшина Е.П., Новиков Б.И., Рябов А.К.* Донные отложения водохранилищ и их влияние на качество воды. Киев: Наукова думка, 1987. 164 с.
9. *Ерина О.Н., Шинкарева Г.Л., Терешина М.А., Соколов Д.И. и др.* Накопление химических элементов в микрочастицах речной взвеси // Эколого-экономическая безопасность горнопромышленных регионов. Екатеринбург: Институт экономики УрО РАН, 2022. С. 91–106.
10. Заводы города Осташков Тверской области. URL: <https://xn--80aegj1b5e.xn--p1ai/factories/ostashkov> Дата обращения 02.07.2021.
11. *Законнов В.В.* Осадкообразование в водохранилищах Волжского каскада в XXI веке // Современные проблемы водохранилищ и их водосборов: труды VIII Всерос. научно-практ. конф. с междунар. участием. Пермь: ПГНИУ, 2021. С. 89–94.
12. *Законнов В.В., Законнова А.В., Цветков А.И., Шершьева Н.Г.* Гидродинамические процессы и их роль в формировании донных осадков водохранилища Волжско-Камского каскада // Труды Института биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН. 2018. № 81 (84). С. 35–46.
13. *Зюзин Б.Ф., Юдин С.А.* Обобщенный вариант прочности торфяных структур // Труды Инсторфа. 2014. № 9 (62). С. 25–29.
14. *Иванов Г.Н.* Динамика загрязнения водных экосистем озера Селигер тяжелыми металлами // Труды Инсторфа. 2014. № 9 (62). С. 16–24.
15. *Иванов Г.Н., Кривенко И.В., Смирнова М.А., Испирян С.Р.* Методы оценки загрязнения донных отложений тяжелыми металлами // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия: Строительство. Электротехника и химические технологии. 2021. № 1 (9). С. 79–86.
16. Ивановское водохранилище: Современное состояние и проблемы охраны // В.А. Абакумов, Н.П. Ахметьева, В.Ф. Бреховских и др. М.: Наука, 2000. 344 с.
17. *Коломийцев Н.В., Ильина Т.А.* Распределение тяжелых металлов и мышьяка в донных отложениях Угличского водохранилища // Мелиорация и водное хозяйство. 2008. № 6. С. 10–13.
18. *Коломийцев Н.В., Корженевский Б.И., Аверкина Т.И., Самарин Е.Н.* Характеристика состава донных отложений озера Селигер и Ивановского водохранилища // Сергеевские чтения. Вып. 18. М.: РУДН, 2016. С. 58–62.
19. *Коломийцев Н.В., Корженевский Б.И., Ильина Т.А., Гетьман Е.Н.* Оценка техногенной нагрузки на водные объекты по загрязненности донных отложений // Мелиорация и водное хозяйство. 2015. № 6. С. 15–19.
20. *Коломийцев Н.В., Корженевский Б.И., Ильина Т.А., Толкачев Г.Ю.* Миграция тяжелых металлов в донных отложениях озера Селигер // Мелиорация и водное хозяйство. 2021. № 6. С. 8–14.
21. *Корженевский Б.И., Коломийцев Н.В., Ильина Т.А., Гетьман Н.О.* Мониторинг загрязнения автотранспортом малых рек Московской области тяжелыми металлами // Безопасность жизнедеятельности. 2018. № 4 (208). С. 24–29.
22. *Корженевский Б.И., Толкачев Г.Ю., Ильина Т.А., Коломийцев Н.В.* Основные принципы мониторинга загрязнения большой реки (на примере бассейна реки Волги) // Строймного. 2017. № 2 (7). С. 1–7.
23. *Косов В.И., Иванов Г.Н., Левинский В.В.* Исследования загрязнения тяжелыми металлами донных отложений Верхней Волги // Вестник Тверского государственного технического университета. 2002. № 1. С. 5–9.
24. Моделирование эрозионных процессов на территории малого водосборного бассейна // Под ред. А.С. Керженцева, Р. Майснера. М.: Наука, 2006. 223 с.
25. *Сает Ю.Е., Янин Е.П.* О комплексном составе техногенных гидрохимических аномалий // Водные ресурсы. 1991. № 2. С. 135–140.
26. *Силантьева О.А., Бруль Т.Н.* Современное геоэкологическое состояние акватории и прибрежных территорий озера Селигер // Электронный научно-образовательный журнал ВГСПУ “Грани познания”. № 6 (65). 27 ноября 2019. С. 114–117. URL: www.grani.vspu.ru.

27. *Суслова С.Б., Шилькрот Г.С., Кудерина Т.М.* Гидро-геохимическая характеристика вод Селигера и Верхневолжских озер (по многолетним данным) // Проблемы природопользования и экологическая ситуация в европейской России и сопредельных странах. Матер. VI Междунар. науч. конф. / Отв. ред. Голеусов П.В. Белгород: Политерра, 2015. С. 324–328.
28. Техногенное загрязнение речных экосистем / Под ред. В.Е. Райнина и Г.Н. Виноградовой. М.: Научный Мир, 2002. 140 с.
29. *Толкачев Г.Ю., Коломийцев Н.В., Корженевский Б.И.* Миграция и трансформация форм тяжелых металлов на водосборной территории и в донных отложениях Иваньковского и Угличского водохранилищ // Мелиорация и водное хозяйство. 2017. № 6. С. 35–39.
30. *Толкачев Г.Ю., Корженевский Б.И., Коломийцев Н.В.* Сравнительная характеристика форм существования тяжелых металлов в донных отложениях Иваньковского водохранилища в 2001–2002 и 2021 годах // Экологические системы и приборы. 2022. № 11. С. 3–12.
31. *Филатов Н.Н.* Динамика озер. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 166 с.
32. *Цыганов А.А.* Морфометрия плесов и островов озера Селигер // Вестник Тверского государственного университета. Серия: География и геоэкология. 2011. № 1. С. 35–48.
33. *Янин Е.П.* Техногенные геохимические ассоциации в донных отложениях малых рек (состав, особенности, методы оценки). М.: ИМГРЭ, 2002. 52 с.
34. *Ackermann F.* A Procedure for Correcting the Grain Size Effect in Heavy Metal Analysis // Environmental Technology. 1980. Lett. 1. P. 518–527.
35. *Fuchik P., Novak P., Zizhala D.* A combined statistical approach for evaluation of the effects of land use, agricultural and urban activities on stream water chemistry in small tile-drained catchments of south Bohemia, Czech Republic // Environmental Earth Sciences. V. 72. № 6. 2014. P. 2195–2216.
36. *Matschullat J., Ottenstein R., Reimann C.* Geochemical background – can we calculate it? // Environmental Geology. V. 39. № 9. 2000. P. 990–1000.
37. *Mueller G.* Schwermetalle in den Sedimenten des Rheins - Veraenderungen seit 1971 // Umschau 79. 1979. H. 24. S. 778–783.
38. *Mueller G., Ottenstein R., Yahya A.* Standardized particle size for monitoring, inventory, and assessment of metals and other trace elements in sediments: <20 µM or <2 µM? // Fresenius' J. of Analytical Chemistry. 2001. V. 371. № 5. P. 637–642.
39. *Tessier A., Campbell P.G.C., Bisson M.* Sequential Extraction Procedure for the Speciation of Particulate Trace Metals // Analytical chemistry. 1979. V. 51. № 7. P. 844–851.
40. *Turekian K.K., Wedepohl K.H.* Distribution of the Elements in Some Major Units of the Earth's Crust // Geological Society of America. Bulletin. 1961. V. 72. P. 175–192.

MONITORING OF SEDIMENT POLLUTION FOR VARIOUS WATER BODIES IN THE UPPER VOLGA REGION

G. Yu. Tolkachev^{a,#}, B. I. Korzhenevskiy^{a,##}, and N. V. Kolomiytsev^{a,###}

^a*Kostyakov All-Russian Research Institute of Hydraulic Engineering and Amelioration,
B. Akademicheskaya ul. 44, Moscow, 127434 Russia*

[#]*E-mail: k-26@yandex.ru*

^{##}*E-mail: 542609@list.ru*

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

The problem of water body pollution with heavy metals is still relevant. From the viewpoint of technogenic load, the most hazardous pollutants are elements Hg, Cd, Zn, Pb, Cu, Cr, Co, Ni, Fe, Mn, and As. To systematize the research, the objects of different hierarchical levels were identified. Based on many years of experimental work, contamination of sediments with heavy metals was assessed for the Upper Volga system, i.e., Lake Seliger, an unregulated section of the Upper Volga, Ivankovskoe and Uglichskoe reservoirs. The largest taxon is the basin of the reservoir with the adjoining watershed area with cities and towns located on it, tributaries of various orders, smaller elements of natural and natural-technogenic relief. Urban and settlement agglomerations located on the coasts of reservoirs and unregulated areas or within watersheds are smaller in area, but no less significant in their role in water body pollution. Small rivers contribute to pollution/purification, which can contribute to the flow of both clean and polluted silty material into large watercourses. Different areal and temporal survey modes are offered for taxa of different hierarchy. The practical results of studies of the content in sediments of the listed objects of heavy metals – Cr, Co, Ni, Zn, Cd, Pb, As, Fe and Mn are presented. Described or provided references to the methods used in the experiments. The general picture of pollution is presented and the tendencies of its change in space and time are noted.

Keywords: *monitoring, heavy metals, pollution, taxa, category sites, sediments, water bodies*

REFERENCES

- Venitsianov, E.V., Saltankin, V.P. *Monitoring dna* [Monitoring of the bottom]. *Nauchnye osnovy sozdaniya sistem monitoringa kachestva prirodnykh poverkhnostnykh sistem* [Scientific foundations of the creation of systems for monitoring the quality of natural surface water]. Moscow, Nauchnyi mir Publ., 2016, pp. 110–132. (in Russian)
- Venitsianov, E.V. *Nekotorye osobennosti sorbsii tyazhelykh metallov sloem donnykh osadkov i pochvogrunтов* [Some features of sorption of heavy metals by a layer of sediments and soils]. *Vodnye resursy*, 1997, no. 3, pp. 29–35. (in Russian)
- Vinogradov, A.P. *Geokhimiya redkikh i rasseyannykh elementov v pochvakh* [Geochemistry of rare and scattered elements in soils]. Moscow, AN SSSR Publ., 1957, 235 p. (in Russian)
- Vodokhranilishche Votkinskoi GES* [Reservoir of the Votkinskaya hydroelectric power station] Yu.M. Matarzin, Ed., Perm, Perm university Publ., 1968, 164 p. (in Russian)
- Danilov-Danilyan, V.I. *Pokazateli effektivnosti vnedreniya kontsepsii po snizheniyu diffuznogo zagryazneniya v basseine Volgi v ekonomicheskoi i ekologicheskoi sferakh* [Indicators of the effective implementation of the concept of reducing diffuse pollution in the Volga basin in the economic and environmental aspects]. Diffuse pollution of water bodies: problems and solutions. Moscow, Institute of Water Problems RAS, 2020, pp. 399–405. (in Russian)
- Danilov-Danilyan, V.I. *Natsional'nyi prioritetnyi projekt "Ozdorovlenie Volgi": pervyy shag k normalizatsii ekologicheskogo sostoyaniya basseina velikoi reki* [National priority project "Improving the Volga River": the first step to normalizing the ecological state of the great river basin]. Scientific problems of improving Russian rivers and ways to solve them. Moscow, Sudiya F1 Publ., 2019, pp. 12–16. (in Russian)
- Danilov-Danilyan, V.I., Polyanin, V.O., Fashchevskaya, T.B., Kirpichnikova, N.V., et al. *Problemy snizheniya diffuznogo zagryazneniya vodnykh ob'ektov i povyshenie effektivnosti vodookhrannykh program* [The problem of reducing diffuse pollution of water bodies and improving the efficiency of water conservation programs]. *Vodnye resursy*, 2020, vol. 47, no. 5, pp. 503–514. (in Russian)
- Denisova, A.I., Nakhshina, E.P., Novikov, B.I., Ryabov, A.K. *Donnye otlozheniya vodokhranilishch i ikh vliyaniye na kachestvo vody* [The sediments of reservoirs and their influence on water quality]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1987, 164 p. (in Russian)
- Erina, O.N., Shinkareva, G.L., Tereshina, M.A., Sokolov, D.I., et al. *Nakoplenie khimicheskikh elementov v mikrochastitsakh rechnoi vzvesi* [Accumulation of chemical elements in microparticles of river suspension]. *Ekologo-ekonomicheskaya bezopasnost' gornopromyshlennykh regionov* [Ecological and economic security of mining regions]. Yekaterinburg, Institute of Economics, Ural Division RAS, 2022, pp. 91–106. (in Russian)
- Zavody goroda Ostashkov Tverskoi oblasti* [Factories in the city of Ostashkov, the Tver region]. URL: <https://xn--80aegj1b5e.xn--p1ai/factories/ostashkov> (Accessed 02.07.2021). (in Russian)
- Zakonov, V.V. *Osadkoobrazovanie v vodokhranilishchakh Volzhskogo kaskada v XXI veke* [Sedimentation in reservoirs of the Volga cascade in the XXI century]. *Sovremennyye problemy vodokhranilishch i ikh vodosborov* [Modern problems of reservoirs and their catchment areas]. Proc. of the VIII All-Russia Sci. and Pract. Conf. Perm, PGNIU, 2021, pp. 89–94. (in Russian)
- Zakonov, V.V., Zakonova, A.V., Tsvetkov, A.I., Sherysheva, N.G. *Gidrodinamicheskie protsessy i ikh rol' v formirovaniy donnykh osadkov vodokhranilishch Volzhsko-Kamskogo kaskada* [Hydrodynamic processes and their role in the formation of sediments of reservoirs of the Volga-Kama cascade]. Proc. Papanin Institute of Biology of Inland Waters RAS, 2018, no. 81 (84), pp. 35–46. (in Russian)
- Zyuzin, B.F., Yudin, S.A. *Obobshchennyi variant prochnosti torfyanykh struktur* [Generalized version of the strength of peat structures]. *Trudy Instorfa*, 2014, no. 9 (62), pp. 25–29. (in Russian)
- Ivanov, G.N. *Dinamika zagryazneniya vodnykh ekosistem ozera Seliger tyazhelymi metallami* [Dynamics of pollution of aquatic ecosystems of Lake Seliger by heavy metals]. *Trudy Instorfa*, 2014, no. 9 (62), pp. 16–24. (in Russian)
- Ivanov, G.N., Krivenko, I.V., Smirnova, M.A., Ispiryanyan, S.R. *Metody otsenki zagryazneniya vodnykh otlozheniy tyazhelymi metallami* [Methods for assessing contamination of sediments by heavy metals]. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo. Elektrotekhnika i khimicheskije tekhnologii*, 2021, no. 1 (9), pp. 79–86. (in Russian)
- Ivan'kovskoe vodokhranilishche: Sovremennoe sostoyaniye i problemy okhrany* [Ivan'kovskoe reservoir: Current state and problems of protection]. V.A. Abakumov, N.P. Akhmet'eva, V.F. Brekhovskikh et al. Moscow, Nauka Publ., 2000, 344 p. (in Russian)
- Kolomiytsev, N.V., Ilyina, T.A. *Raspredelenie tyazhelykh metallov i mysh'yaka v donnykh otlozheniyakh Uglichskogo vodokhranilishcha* [Distribution of heavy metals and arsenic in the sediments of Uglich reservoir]. *Melioratsiya i vodnoe khozyaistvo*, 2008, no. 6, pp. 10–13. (in Russian)
- Kolomiytsev, N.V., Korzhenevskii, B.I., Averkina, T.I., Samarin, E.N. *Kharakteristika sostava donnykh otlozheniy ozera Seliger i Ivan'kovskogo vodokhranilishcha* [Characteristics of the composition of sediments of Lake Seliger and Ivankovsky reservoir]. *Sergeev readings*, issue 18, V.I. Osipov, Ed., 2016, pp. 58–62. (in Russian)
- Kolomiytsev, N.V., Korzhenevskii, B.I., Il'ina, T.A., Get'man, E.N. *Otsenka tekhnogennoi nagruzki na vodnye ob'ekty po zagryaznennosti donnykh otlozheniy* [Assessment of technogenic load on water bodies by pollution of sediments]. *Melioratsiya i vodnoe khozyaistvo*, 2015, no. 6, pp. 15–19. (in Russian)
- Kolomiytsev, N.V., Korzhenevskii, B.I., Il'ina, T.A., Tolkachev, G.Yu. *Migratsiya tyazhelykh metallov v donnykh otlozheniyakh ozera Seliger* [Migration of heavy metals in sediments of Lake Seliger]. *Melioratsiya i vodnoe khozyaistvo*, 2021, no. 6, pp. 8–14. (in Russian)

21. Korzhenevskii, B.I., Kolomiitsev, N.V., Il'ina, T.A., Get'man N.O. *Monitoring zagryazneniya avtotransportom malykh rek Moskovskoi oblasti tyazhelymi metallami* [Monitoring of pollution by motor transport of small rivers of the Moscow region with heavy metals]. *Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti*, 2018, no. 4 (208), pp. 24–29. (in Russian)
22. Korzhenevskii, B.I., Tolkachev, G.Yu., Il'ina, T.A., Kolomiitsev, N.V. *Osnovnye printsipy monitoringa zagryazneniya bol'shoi reki (na primere basseina reki Volgi)* [Basic principles of pollution monitoring of a large river (on the example of the Volga River basin)]. *StroyMnogo*, 2017, no. 2 (7), pp. 1–7. (in Russian)
23. Kosov, V.I., Ivanov, G.N., Levinskii, V.V. *Issledovaniya zagryazneniya tyazhelymi metallami donnykh otlozhenii Verkhnei Volgi* [Studies of bottom sediment pollution with heavy metals of the Upper Volga region]. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2002, no. 1, pp. 5–9. (in Russian)
24. *Modelirovanie erozionnykh protsessov na territorii malogo vodosbornogo basseina* [Modeling of erosion processes in the territory of a small catchment basin]. A.S. Kerzhentsev, R. Meissner, Eds., Moscow, Nauka Publ., 2006, 223 p. (in Russian)
25. Saet, Yu.E., Yanin, E.P. *O kompleksnoy sostave tekhnogennykh gidrokhimicheskikh anomalii* [On the complex composition of technogenic hydrochemical anomalies]. *Vodnye resursy*, 1991, no. 2, pp. 135–140. (in Russian)
26. Silantyeva, O.A., Brul, T.N. *Sovremennoe geoekologicheskoe sostoyanie akvatorii i pribrezhnykh territorii ozera Seliger* [The modern geoecological state of the water area and coastal territories of Lake Seliger]. *Grani poznaniya*, no. 6 (65), November 27, 2019. URL: www.grani.vspu.ru, pp. 114–117. (in Russian)
27. Suslova, S.B., Shilkrot, G.S., Kuderina, T.M. *Gidrogeokhimicheskaya kharakteristika vod Seligera i Verkhnevolzhskikh ozer (po mnogoletnim dannym)* [Hydrogeochemical characteristics of Seliger and Upper Volga lakes waters (according to long-term data)]. *Problemy prirodopol'zovaniya i ekologicheskaya situatsiya v evropeiskoi Rossii i sopredel'nykh stranakh* [Problems of nature management and ecological situation in European Russia and neighboring countries]. Proc. VI Int. Sci. Conf., Goleusov, P.V., Ed., Belgorod, Polyterra Publ., 2015, pp. 324–328. (in Russian)
28. *Tekhnogennoe zagryaznenie rechnykh ekosistem* [Technogenic pollution of river ecosystems]. V.E. Rainin and G.N. Vinogradova, Eds., Moscow, Nauchnyi mir Publ., 2002, 140 p. (in Russian)
29. Tolkachev, G.Yu., Kolomiitsev, N.V., Korzhenevskii, B.I. *Migratsiya i transformatsiya form tyazhelykh metalloov na vodosbornoi territorii i v donnykh otlozheniyakh Ivan'kovskogo i Uglichskogo vodokhranilishch* [Migration and transformation of forms of heavy metals in the catchment area and in the sediments of the Ivan'kovskoe and Uglichskoe reservoirs]. *Melioratsiya i vodnoe khozyaistvo*, 2017, no. 6, pp. 35–39. (in Russian)
30. Tolkachev, G.Yu., Korzhenevskii, B.I., Kolomiitsev, N.V. *Sravnitel'naya kharakteristika form sushchestvovaniya tyazhelykh metallov v donnykh otlozheniyakh Ivan'kovskogo vodokhranilishcha v 2001–2002 b 2021 godakh* [Comparative characteristics of the forms of existence of heavy metals in the sediments of the Ivan'kovskoe reservoir in 2001–2002 and 2021]. *Ekologicheskie sistemy i pribory*. 2022, no. 11, pp. 3–12. (in Russian)
31. Filatov, N.N. *Dinamika ozer* [Dynamics of lakes]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1983, 166 p. (in Russian)
32. Tsyganov, A.A. *Morfometriya plesov i ostrovov ozera Seliger* [Morphometry of reaches and islands of Lake Seliger]. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geografiya i geoekologiya*, 2011, no. 1, pp. 35–48. (in Russian)
33. Yanin, E.P. *Tekhnogennye geokhimicheskie assotsiatsii v donnykh otlozheniyakh malykh rek (sostav, osobennosti, metody otsenki)* [Technogenic geochemical associations in sediments of small rivers (composition, features, and assessment methods)]. Moscow, IMGRE Publ., 2002, 52 p. (in Russian)
34. Ackermann, F.A. Procedure for correcting the grain size effect in heavy metal analysis. *Environmental Technology*, 1980, Lett.1, pp. 518–527.
35. Fuchik, P., Novak, P., Zizhala, D. A combined statistical approach for evaluation of the effects of land use, agricultural and urban activities on stream water chemistry in small tile-drained catchments of south Bohemia, Czech Republic. *Environmental Earth Sciences*, 2014, vol. 72, no. 6, pp. 2195–2216.
36. Matschullat, J., Ottenstein, R., Reimann, C. Geochemical background – can we calculate it? *Environmental Geology*, vol. 39, no. 9, 2000, pp. 990–1000.
37. Mueller, G. Schwermetalle in den Sedimenten des Rheins – Veraenderungenseit 1971. *Umschau* 79, 1979, H. 24, pp. 778–783. (in German).
38. Mueller, G., Ottenstein, R., Yahya, A. Standardized particle size for monitoring, inventory, and assessment of metals and other trace elements in sediments: <20 µM or <2 µM? // *Fresenius' Journal of Analytical Chemistry*, 2001, vol. 371, no. 5, pp. 637–642.
39. Tessier, A., Campbell, P.G.C., Bisson, M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals. *Analytical chemistry*, 1979, vol. 51, no 7, pp. 844–851.
40. Turekian, K.K., Wedepohl, K.H. Distribution of the Elements in Some Major Units of the Earth's Crust. *Geological Society of America, Bulletin*, 1961, vol. 72, pp. 175–192.

УДК 556.314

ОСОБЕННОСТИ СТРОЕНИЯ, ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ И РЕКОНСТРУКЦИИ ПОЛИГОНА ЗАХОРОНЕНИЯ ОТХОДОВ ПАО “НИЖНЕКАМСКНЕФТЕХИМ”

© 2023 г. Р. Х. Мусин^{1,*}, А. Р. Галиева^{1,**}, Н. А. Курлянов^{2,***}

¹Казанский федеральный университет (КФУ),
ул. Кремлевская, 18, Казань, 420008 Россия

²ООО “Экостандарт “Технические решения”,
Переведеновский пер., 13, Москва, 105082 Россия

*E-mail: Rustam.Musin@kpfu.ru

**E-mail: abdullina_albina94@mail.ru

***E-mail: nikitakurlyanov@gmail.com

Поступила в редакцию 10.01.2023 г.

После доработки 10.01.2023 г.

Принята к публикации 07.04.2023 г.

Одним из крупнейших нефтехимических предприятий Европы является ПАО “Нижнекамскнефтехим”. Первая промышленная продукция здесь была получена в 1967 г. Отходы производства размещаются в шламонакопителе и на полигоне отходов. Полигон функционирует с 1982 г., оборудован системами поверхностного и подземного дренажа, противодиффузионными завесами, двумя поясами наблюдательных скважин. В его пределах накоплено более 0.5 млн м³ преимущественно твердых отходов III–V классов опасности. Ресурсы полигона выработаны более чем на 80%. Его эксплуатация привела к существенному подъему уровня и загрязнению грунтовых вод, минерализация которых может достигать 12.75 г/л, а жесткость 73.9 ммоль/л. Данные негативные гидрогеоэкологические следствия обусловлены прежде всего усилением атмосферного питания грунтовых вод и активным взаимодействием атмосферных осадков с веществом отходов. На полигоне планируется реконструкция. Предполагается заключение отходов в водонепроницаемый резервуар, ограниченный искусственными геосинтетическими материалами с крайне низкими фильтрационными свойствами. Гидродинамическим и балансовым методами определены: величины инфильтрационного питания грунтовых вод в естественных и нарушенных условиях, производительность подземного дренажа; непрерывно формируемый объем загрязненных подземных вод, не перехватываемый дренажной системой, расход которых составляет 116.7 м³/сут; современный и прогнозный (постреконструкционный) водные балансы. Показано, что планируемая реконструкция должна привести к снижению уровня грунтовых вод и степени их загрязнения. При этом наиболее активно будет происходить снижение концентраций органических веществ, являющихся приоритетными загрязнителями.

Ключевые слова: полигон отходов, загрязнение гидросферы, водный баланс, инфильтрационное питание грунтовых вод, самоочищение подземных вод

DOI: 10.31857/S0869780923030074, EDN: WNAVOL

ВВЕДЕНИЕ

Одна из важнейших мировых геоэкологических проблем – проблема накопления отходов. Наиболее опасными являются радиоактивные отходы и отходы химической промышленности, а наиболее опасными загрязняющими веществами – синтетические органические вещества и тяжелые металлы. Их негативное воздействие на биоту заключается в нарушении процессов обмена веществ, что усугубляется возможностью их интенсивного биоконцентрирования [3, 5].

Крупнейшей нефтехимической компанией Европы является ПАО “Нижнекамскнефтехим”. Предприятие занимает лидирующие позиции по производству синтетических каучуков и пластиков. Первая продукция была получена в 1967 г. В настоящее время ее ежегодный объем в денежном выражении превышает 100 млрд руб. Около половины этой продукции экспортируется [9]. Отходы производства депонируются в пределах шламонакопителя и поверхностного полигона захоронения. Полигон функционирует с 1982 г. Его площадь 25 га (500 × 500 м). Он состоит из 48 карт, с проектными размерами 50 × 70 м и глу-

биной 3–5 м. Противофильтрационным экраном днища карт служит слой уплотненной глины, в единичных картах – бетон. На полигоне захоронено более 0,5 млн м³ промышленных отходов. Это около 250 видов разноагрегатных отходов III–V классов опасности, среди которых преобладают отходы катализаторов, полимерные материалы, нефтешламы. Ежегодное поступление отходов – 37 тыс. м³ (48 тыс. т). По официальным данным соответствующих служб предприятия соотношение твердых, пастообразных и жидких отходов составляет (%) 88–10–2 соответственно. Степень заполненности объекта превышает 80%.

Полигон отходов довольно хорошо оснащен в инженерном плане. Он огорожен бетонным забором и обеспечен круглосуточной охраной. По периметру картового поля располагаются нагорная канава и подземный трубчатый дренаж, по которым дренажные воды самотеком поступают в специальный накопитель, откуда они перекачиваются на биологические очистные сооружения (БОС) предприятия. С северной и южной стороны располагаются противофильтрационные завесы в виде грунтовых глиняных стенок. Перечисленные элементы инженерной системы защиты окружающей среды создавались с конца 1990-х до 2005 г. В полном объеме они функционируют с 2006 г. Полигон обеспечен двумя поясами наблюдательных скважин, расположенных вокруг него и оборудованных на первый от поверхности водоносный горизонт. Глубина скважин 10 м. Первый пояс непосредственно примыкает к забору, ограничивающему полигон. Он включает 12 скважин. Второй пояс из 20 скважин удален от первого на 150 м.

В ближайшее время будет проведена реконструкция полигона. Она предполагает заключение отходов в водонепроницаемые резервуары. Создание таких резервуаров планируется за счет выемки отходов из большей части уже полностью заполненных карт, установления в их основании противофильтрационного экрана (ПФЭ), обратной засыпки карт их первичным содержимым с планировкой для создания уклонов от центральной части карт к их периферии и, наконец, перекрытия карт ПФЭ и почвенным грунтом с высевом травянистой растительности. В качестве ПФЭ будут использоваться геосинтетические материалы, обладающие крайне низкими фильтрационными свойствами – $(2-5) \times 10^{-11}$ м/с ($(1.7-4.6) \times 10^{-6}$ м/сут). Содержимое части карт перекладываться не будет, такие карты будут только перекрыты верхним ПФЭ. В качестве рабочих планируется оставить 8 карт, в них будет присутствовать только нижний ПФЭ. Поверхностный сток с спланированных и перекрытых ПФЭ карт будет отводиться по специальным лоткам в накопитель дренажных вод и перекачиваться на БОС.

Для удаления газов (метан, водород, углекислый и др.), формирование которых в теле отходов весьма вероятно, и предотвращения нагрева и воспламенения отходов, а также взрывных явлений предполагается сооружение газоотводных труб.

Рассмотрение эффективности существующих инженерных систем защиты полигона, предварительная оценка эффективности планируемых реконструкционных мероприятий и анализ влияния полигона на гидросферу представляют значительный научно-практический интерес.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектами исследования явились действующий полигон захоронения промышленных отходов ПАО «Нижекамскнефтехим», а также поверхностная и подземная гидросфера в его обрамлении.

Полигон расположен в приосевой части залеженного водораздела малых рек (абсолютные отметки 186–199 м), являющихся притоками рек Зай и Кама (урез Камы – 53 м). Ближайшие к полигону объекты – крупное нефтехимическое предприятие, ограничение которого расположено севернее в 300 м, а также два небольших сельских населенных пункта на удалении 3 км в ЮЗ и ЮВ направлениях соответственно. Ориентировка поверхностного и подземного стока – ЮЗ. Высотное превышение полигона над ручьем в районе первой деревни ~100 м. Средний уклон поверхности в этом направлении 0.033. В ЮВ части полигона находится верховье оврага с малодобитым нисходящим родником. Этот овраг спускается к первому из отмеченных населенному пункту. На большем протяжении он характеризуется наличием водного потока.

Верхняя часть разреза сложена платформенными комплексами полигенных пестроцветных карбонатно-терригенных пермских отложений в объеме уржумского и казанского ярусов, перекрытых четвертичными элювиально-делювиальными суглинками мощностью 1–3 м. Основание уржумских отложений залегает на гипсометрическом уровне 160 м. Они в основном представлены переслаиванием глин и тонко-, мелкозернистых песчаников. Мощности отдельных прослоев достигают 3 м. Алевриты и мергели играют резко подчиненную роль. В основании присутствуют маломощные (до 0.4–0.5 м) прослои глинистых известняков. Образования казанского яруса отличаются четко выраженной ритмичностью. В целом возможно выделение 7 отдельных ритмов (пачек), которые обычно начинаются песчаниками и завершаются карбонатными породами (в верхней части яруса карбонаты могут замещаться глинами). Мощности слоев терригенных

Таблица 1. Породный состав верхней части разреза (%)

Ярус, подъярус	Индекс	Мощность, м	Глины	Песчаники	Известняки
Уржумский	P ₂ ur	42	54	36	10
Верхнеказанский	P ₂ kz ₂	78	67	28	5
Нижнеказанский	P ₂ kz ₁	80	80	12	8

пород – до 5 м, редко более, карбонатных – до 2 м. В целом в рассматриваемой части разреза преобладают глинистые породы (табл. 1). В основании казанского яруса залегают “лингуловые глины”, представляющие собой региональный водоупор. Его кровля под полигоном находится на гипсометрическом уровне 2–3 м при мощности – 12–13 м. В охарактеризованной слоистой толще циркулируют межпластовые подземные воды (ПВ), связанные нисходящим перетеканием.

Глубина залегания ПВ первого от поверхности водоносного горизонта в пределах полигона в природных условиях составляла 4–8 м. Данный горизонт локализован в уржумских песчаниках и трещиноватых глинах. ПВ здесь имеют субнапорный характер (далее для удобства они будут именоваться грунтовыми водами). Их уровни располагались на отметках 180–191 м, годовая амплитуда колебаний не превышала 1 м. Уровенная поверхность в сглаженной форме повторяла рельеф. Грунтовый поток был ориентирован в ЮЗ направлении к безымянному ручью. Значения напорного градиента – 0.01–0.03. Уровни нижележащих гидрогеологических подразделений занимали (и занимают сейчас) более низкое положение. Основным источником питания грунтового горизонта в пределах площадки полигона являлись инфильтрация атмосферных осадков и боковой приток ПВ по горизонту со стороны осевой части поверхностного водораздела. Питание нижележащих верхне- и нижнеказанского водоносных комплексов происходит за счет нисходящего перетекания и бокового притока по соответствующим водоносным горизонтам также со стороны указанного водораздела. Основной объем разгрузки всех рассматриваемых водоносных горизонтов и комплексов приходится на плановую фильтрацию в ЮЗ направлении, меньшая ее часть – нисходящее перетекание.

Грунтовые воды до начала функционирования полигона характеризовались гидрокарбонатным магниевно-кальциевым составом с минерализацией 0.36–0.44 г/л и жесткостью 4.3–8.2 ммоль/л (типы воды – согласно [6], под жесткостью здесь и далее понимается общая жесткость). Воды верхне- и нижнеказанского комплексов имели сходные гидрогеохимические показатели; их основной объем также отличался питьевым качеством. Данные особенности состава определялись исключительно природными факторами. Важней-

шими гидрогеохимическими процессами, контролировавшими состав ПВ, являлись углекислотное выщелачивание и гидролиз карбонатно-терригенных пород.

Район полигона отличается довольно высокой степенью геолого-гидрогеологической изученности. Здесь проведены геологосъемочные работы масштабов 1:200000 и 1:50000, эколого-гидрогеологическая съемка масштаба 1:200000, структурное бурение, поисково-разведочные работы на питьевые ПВ, многочисленные разноплановые тематические работы, а также специализированные исследования непосредственно на площадке полигона и в его ближайшем обрамлении инженерно-геологической, гидрогеологической, геоэкологической и биоэкологической направленности.

Авторы статьи обобщали весь имеющийся материал и составляли гидрогеологические обобщения по полигону в 2012 и 2015 г., небольшая часть этих данных отражена в [4, 13], а также провели дополнительное опробование водопроявлений в его окрестностях с химико-аналитическими исследованиями гидропроб в 2018–2020 гг. (табл. 2).

Максимально широкий спектр проанализированных компонентов и параметров состава вод включает: рН, сухой остаток, жесткость, перманганатную окисляемость, ХПК, БПК, кремнекислоту; ионный состав: HCO_3^- , CO_3^{2-} , SO_4^{2-} , Cl^- , NO_3^- , NO_2^- , PO_4^{3-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , $(\text{Na} + \text{K})^+$, NH_4^+ ; микрокомпонентный состав: Al, As, B, Ba, Be, Br, Cd, Cu, Co, Cr, F, Fe_{общ}, Hg, Mn, Mo, Ni, Pb, Se, Sr, Zn; органические вещества: нефтепродукты, фенолы, формальдегиды, бензол, толуол, ксилол, этилбензол, АСПАВ, CN, HS, у-ГХЦГ, ДДТ, 2,4-Д; α- и β-активность. Необходимо отметить, что постоянный мониторинг за качественным составом подземных и поверхностных вод по наблюдательным скважинам полигона и в его окрестностях ведет аналитическая служба ПАО “Нижнекамскнефтехим”. Данные этой службы очень близки данным организаций, отмеченных в табл. 2. Все дальнейшие рассуждения по особенностям и условиям формирования состава природных и природно-техногенных вод базируются на аналитике сторонних организаций и собственных материалах.

Таблица 2. Фактический гидрохимический материал по полигону отходов

Время опробования	Организация	Кол-во проб	Кол-во проанализированных параметров
1977 г.	“Гипрокаучук”, г. Москва	4	9
1992 г.	“Гипрокаучук”, г. Москва	32	9
2004 г.	“Татарстангеология”, г. Казань	24	51
2011 г.	“Стройпроектизыскания”, г. Нижнекамск; “ЭкоЛидер”, г. Казань	30	40
2012 г.	“Экосфера”, “Геолайн”, г. Казань	27	24
2018–2020 гг.	Авторы статьи	22	26

Для решения основных задач авторами были определены:

- величины инфильтрационного питания грунтовых вод в пределах картового поля полигона в естественных и нарушенных условиях;
- производительность дренажной системы полигона;
- объем загрязненных вод, генерируемых полигоном;
- характер, условия формирования и динамика изменения во времени гидрогеохимического поля;
- современный и прогнозный водные балансы;

– гидрогеоэкологические последствия реконструкции.

Величины инфильтрационного питания грунтовых вод определялись на основе анализа гидродинамических сеток потоков по довольно детальным картам гидроизогипс на 01.12.1977 г., 11.12.1991 г. и 23.09.2011 г. (общий характер этих карт довольно сходный, длительная эксплуатация полигона не привела к нарушению генерального Ю–ЮЗ направления тока грунтовых вод). Отдельные гидроизогипсы были определены в качестве “входных” и “выходных” сечений (рис. 1). В каждом сечении были определены расходы потоков на основе закона Дарси:

$$Q = B \times h \times k \times I, \quad (1)$$

где Q – расход потока ($\text{м}^3/\text{сут}$), B – ширина потока (м), h – мощность потока (м), k – коэффициент фильтрации (м/сут), I – напорный градиент (д.е.).

Коэффициенты фильтрации являлись средневзвешенными по мощности для двух преобладающих в разрезе грунтового водоносного горизонта разностей пород – песчаников и глин уржумского яруса. Средние значения их фильтрационной способности на основе многочисленных опытно-фильтрационных работ в виде откачек и наливов, а также лабораторных испытаний, составляют 1.23 и 0.05 м/сут соответственно. Уплотненные глины в связи с широко проявленной трещиноватостью слабо водоносные. Величина инфильтрационного питания грунтовых вод (W , м/сут) представляет отношение разницы расходов на “выходном” ($Q_{\text{вых}}$) и “входном” ($Q_{\text{вх}}$) сечениях ($\text{м}^3/\text{сут}$) к площади области фильтрации (F), ограниченной крайними линиями тока подземных вод (м^2):

$$W = \frac{(Q_{\text{вых}} - Q_{\text{вх}})}{F}. \quad (2)$$

Все геометрические характеристики, в том числе B и F в (1) и (2), определялись по топоплану

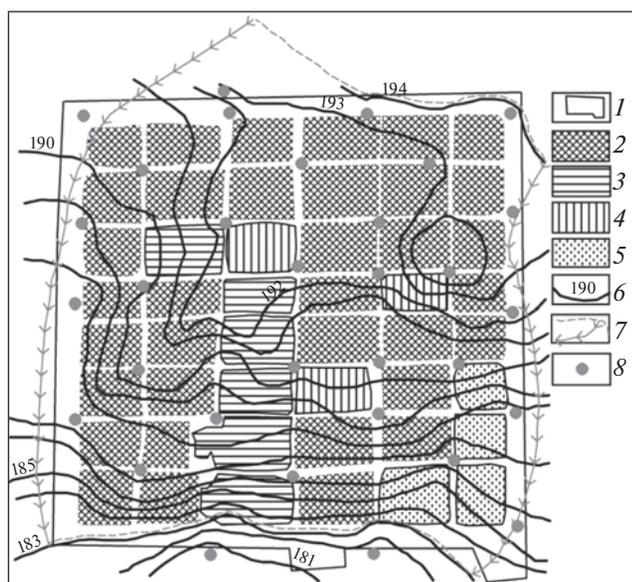


Рис. 1. Карта гидроизогипс на 23.09.2011 г. с линиями тока подземных вод, ограничивающих расчетную область фильтрации: 1 – ограничение полигона; 2–5 – состояние карт на 2015 г.: 2 – заполнены отходами, 3 – заполнены водой, 4 – рабочие, 5 – пустые; 6 – гидроизогипсы и их отметки; 7 – расчетные сечения и линии тока ПВ; 8 – скважины с данными по уровням ПВ.

масштаба 1:500, переоцифрованному авторами в ГИС MapInfo.

Отсутствие надежных данных по величине перекачиваемых дренажных вод из накопителя на БОС предопределило необходимость определения производительности дренажной системы расчетными способами.

Основной элемент *подземного дренажа* – железобетонная труба диаметром 300 мм, уложенная в конусовидную траншею с шириной по низу 1 м, заполненную в нижней 0.5–1.0 м части гранитным щебнем, в средней 2–3 м части – однородным средне- и крупнозернистым песком, а в верхней – местным грунтом. Преобладающая глубина заложения – 4–5 м от земной поверхности и 1.5–2.5 м ниже уровня грунтовых вод (к настоящему времени на большом протяжении уровни грунтовых вод лишь немного превышают отметки основания дренажа). Уклоны дренажных труб – 0.005–0.021. В наиболее эффективно дренируемых частях полигона приток ПВ к трубчатой дрене односторонний. В связи с этим расчет дренажного контура велся по каждой из сторон полигона как однолинейного горизонтального несовершенного дренажа. Полный приток в дренаж определяется так [1, 7, 8, 10]:

$$Q = q \times L, \quad (3)$$

где Q – общий приток ($\text{м}^3/\text{сут}$), q – единичный или удельный односторонний приток ($\text{м}^2/\text{сут}$), L – длина линейного дренажного контура.

Определение единичного расхода проводилось двумя способами. Первый основывается на учете дополнительного (относительно природных значений) инфильтрационного питания [7, 8]:

$$q = w \times l_w, \quad (4)$$

где w – модуль дополнительного инфильтрационного питания ($\text{м}/\text{сут}$), l_w – дальность действия дренажа (м).

Второй способ – использование формулы А.В. Романова [1, 10]:

$$q = \frac{k(h_1 - m)^2}{2R}, \quad (5)$$

где h_1 – мощность водоносного пласта на расстоянии R от дрены (м), R – дальность действия дренажа (м).

Поверхностный дренаж на полигоне представлен нагорной канавой по его периметру. Ее протяженность – 1925 м, ширина по верхней части – 1.2–4.3 м; глубина заложения – 0.3–1.3 м, уклон – 0.012–0.024. Производительность поверхностного дренажа рассчитывалась на основе методики Института гидротехники им. Б.Е. Веденеева [11]. По ней средний многолетний слой годового поверхностного стока определяется через норму осадков:

$$Y = a \times P, \quad (6)$$

где a – коэффициент годового поверхностного стока, индивидуализированный для различных природно-техногенных поверхностей, P – норма осадков ($\text{мм}/\text{год}$, для рассматриваемого района составляет 554.6 $\text{мм}/\text{год}$).

Испарение оценивалось следующим образом [11]:

$$W_{\text{исп.}} = k \times E, \quad (7)$$

где $W_{\text{исп.}}$ – интенсивность испарения ($\text{мм}/\text{год}$), k – коэффициент, индивидуализированный для различных природно-техногенных поверхностей, E – среднегодовое испарение ($\text{мм}/\text{год}$).

Среднегодовое испарение рассчитывается по формуле:

$$E = E_0 \times E/E_0, \quad (8)$$

где E_0 – испаряемость ($\text{мм}/\text{год}$), E/E_0 – относительное испарение.

Испаряемость и относительное испарение для района полигона составляют, соответственно, 600 $\text{мм}/\text{год}$ и 0.7 [11].

Природоохранными сооружениями являются и противодиффузионные завесы (ПФЗ) в виде глиняных стенок в грунте. Они располагаются вдоль северной и южной оконечностей полигона. Их общая длина – 1053 м, ширина по верхней части – 5 м, а по основанию – 2.5 м, глубина заложения по северной части – 5.55–6.0, по южной – 2.3–5.94 м. Коэффициент фильтрации грунтовой стенки на основе лабораторных определений составляет 2×10^{-3} $\text{м}/\text{сут}$. Основное предназначение ПФЗ – ограничение притока грунтовых вод к контуру полигона по его северной периферии и задержка потока загрязненных грунтовых вод по южному ограничению полигона для более эффективного дренирования располагающейся здесь линией подземного трубчатого дренажа. Эффективность ПФЗ хорошо проявляется при их совместном рассмотрении с дренажными контурами. Если учитывать ПФЗ отдельно, то целесообразно сопоставить удельные расходы грунтовых вод в зоне расположения завес на периоды времени до и после их сооружения. Эти удельные расходы ($\text{м}^2/\text{сут}$) определяются по формуле:

$$q = Q/B, \quad (9)$$

где Q – расход потока, определяемый по (1), B – ширина потока.

Если в природных условиях приходные статьи водного баланса полигона в основном определялись атмосферными осадками, то в настоящее время к ним добавляются жидкие отходы. Величина последних по официальным документам предприятия не очень значительна. При условии равномерного поступления жидких отходов их расход составляет 0.68 $\text{м}^3/\text{сут}$. К ним необходимо

Таблица 3. Изменение во времени инфильтрационного питания грунтовых вод на картовом поле полигона отходов

Период времени	Величина инфильтрационного питания грунтовых вод			
	м/сут	м ³ /сут	мм/год	% от нормы осадков
1975 г.	1.85×10^{-4}	39.49	67.57	12.18
1991 г.	4.06×10^{-4}	86.66	148.29	26.74
2011 г.	5.70×10^{-4}	121.67	208.19	37.54

добавить жидкую субстанцию, которая выделяется при уплотнении пастообразных отходов, влажность которых достигает 40%. В этом случае скорость поступления жидких отходов – 2.44 м³/сут. Скорее всего эти данные также не совсем корректные. Более достоверной оценкой величины жидких отходов представляется значение 20% от всей величины промышленных отходов, размещенных на полигоне. В этом случае расход составит 8.63 м³/сут.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Функционирование полигона привело к резким изменениям гидрогеодинамических и гидрогеохимических условий прежде всего грунтового горизонта. Уже первые 10 лет эксплуатации привели к подъему уровня грунтовых вод (УГВ) на 1.0–6.5 м, при преобладающих значениях 4.0–4.5 м (подъем УГВ отмечается и в ближайшей к полигону 50–150 м зоне). Примерно такое же распределение гидростатических напоров отмечается и в настоящее время. Направление тока грунтовых вод не претерпело особых изменений, при этом величины напорных градиентов увеличились до 0.02–0.06.

Минерализация грунтовых вод к 1991–1992 гг. участками возросла до 7.7 г/л, а жесткость – до 69.7 ммоль/л, при преобладающем HCO₃/Na-Ca составе. В ближайшем обрамлении полигона загрязнение грунтовых вод достигло максимального уровня в 2004 г. до начала работы всего комплекса природоохранных сооружений, когда их минерализация на локальных участках составляла 12.75 г/л, а жесткость – 73.9 ммоль/л. С некоторыми вариациями этот уровень сохраняется до настоящего времени, при этом одними из наиболее характерных компонентов-загрязнителей являются органические вещества, прежде всего нефтепродукты (с концентрациями до 982 мг/л) и фенолы (с содержаниями до 13.9 мг/л). Из неорганических веществ максимальная концентрация отмечена для железа, содержания которого могут достигать 153 мг/л. Наиболее минерализованные воды имеют Cl-HCO₃/Na-Ca состав.

Подъем УГВ в пределах полигона и негативная трансформация их качественных характеристик связаны с утечками жидких отходов из карт полиго-

на и, в большей степени, с усилением инфильтрационного питания ПВ. Последнее обусловлено тем, что в пределах полигона изменился режим поверхностного стока, и он, по существу, стал аккумулятором атмосферных осадков. Эти осадки с 1982 г. на площадке полигона могут накапливаться в картах, испаряться и идти на инфильтрацию. Накопление воды в картах ведет к увеличению вертикального напорного градиента, при этом инфильтрация будет только увеличиваться. Свой вклад в этот процесс, естественно, будут оказывать и жидкие отходы. Потенциальной интенсивной инфильтрации способствуют высокое гипсометрическое положение полигона, его “подвешенность” над УГВ (полигон проектировался таким образом, чтобы днища карт располагались в 2–3 м над УГВ; в настоящее время значительная часть карт подтоплена – УГВ превышает отметки днищ карт), а также глинистый характер противофильтрационного экрана днища большей части карт. Водопроницаемость глин увеличивается при их взаимодействии с минерализованными водами, а также при увеличении вертикального напорного градиента [2]. Неблагоприятные изменения качественных характеристик грунтовых вод, в первую очередь, обусловлены взаимодействием атмосферных осадков с веществом отходов. Инфильтрация жидких отходов, в связи с их относительно незначительной величиной, имеет второстепенное значение.

Вывод об усилении инфильтрационного питания грунтовых вод исходит из анализа карт гидроизогипс (табл. 3). Более чем двукратную его интенсификацию через 10 лет от начала эксплуатации полигона можно просто связать с ликвидацией поверхностного стока.

Согласно [11], испарение в природных ландшафтах района полигона составляет 75.7% от нормы осадков. Оставшиеся 24.3% приходятся на поверхностный и подземный сток. Если первый из них ликвидирован, то подземный сток может увеличиться до 24.3% от нормы осадков. В реальности в 1991 г. он составлял 26.74%. Более интенсивное питание в 2011 г. связано со многими факторами: увеличение объема захороненных отходов, в том числе жидких; дозаполнение отходами большей части карт; снижение водоупорных свойств глинистого основания карт. Второй фак-

Таблица 4. Современный и прогнозный (постреконструкционный) водные балансы картового поля полигона отходов

Статьи водного баланса	“Приход” воды, м ³ /сут	“Расход” воды,
		<u>м³/сут</u> %
Атмосферные осадки	324.12/324.12	
Жидкие промышленные отходы	8.63/8.63	
Испарение		<u>184.69/137.74</u> 55.5/41.4(%)
Поверхностный сток		<u>5.46/74.66</u> 1.6/22.4(%)
Подземный сток (инфильтрация):		
а) формирующий питание грунтового горизонта;		<u>121.67</u> 36.6(%)
б) формирующий питание верхнеказанского комплекса;		<u>8.31</u> 2.5(%)
в) суммарно		<u>129.98/97.46</u> 39.1/29.3(%)
Перекачка воды из карт в водоприемную емкость		5.05/? 1.5/?(%)
Итого	332.75/332.75 100%	325.18/309.86 97.7/93.1(%)

Примечание. Во второй и третьей графах: в числителе – современные данные, в знаменателе (курсивом) – прогнозные.

тор из указанных трех ведет к уменьшению внутригрунтового и поверхностного испарения. Величина инфильтрационного питания грунтового горизонта в 37.54% от нормы осадков, проявившаяся в 2011 г., представляется максимальной. Скорее всего, такое питание отмечается и в настоящее время.

Базируясь на общих балансовых характеристиках и определениях величин инфильтрационного питания грунтового водоносного горизонта, можно предположительно оценить величину питания ПВ нижележащего верхнеказанского водоносного комплекса. Если принять, что в ненарушенных условиях поверхностный сток составлял – 10% от нормы осадков, испарение – 75.7%, питание грунтового горизонта – 12.2%, то на питание нижележащего верхнеказанского комплекса идет 2.1%. Это 11.57 мм/год или 6.76 м³/сут. В нарушенных условиях за счет усиления питания грунтового горизонта увеличивается его мощность на 20–25%. Это ведет к росту вертикального напорного градиента, связывающего грунтовой горизонт с верхнеказанским комплексом, примерно на такую же величину. Следовательно, питание

последнего возрастает до 8.31 м³/сут. Определение общей величины подземного стока позволяет оценить современный водный баланс полигона (табл. 4).

Разница между приходными и расходными элементами водного баланса в настоящее время идет на заполнение свободных от отходов карт. Превышение интенсивности поступления атмосферных осадков над поступлением жидких отходов более чем в 30 раз однозначно указывает на то, что основной причиной повышения уровня грунтовых вод и их интенсивного загрязнения в пределах полигона является усиление атмосферного инфильтрационного питания ПВ.

Расход грунтовых вод на “выходе” с полигона (рис. 1) составляет 172.7 м³/сут. Особенности их состава по данным опробования наблюдательных скважин первого пояса скважин отмечены в табл. 5 (приведены максимальные значения по отдельным параметрам, которые фиксировались в разное время).

Довольно значительные вариации значений указанных параметров связаны с узкоструйчатый характером распространения загрязнения, обу-

Таблица 5. Особенности состава грунтовых вод по южному ряду наблюдательных скважин первого пояса

Минерализация, мг/л	Жесткость, ммоль/л	Нефтепродукты, мг/л	ХПК, мг O ₂ /л
$\frac{2999-12750}{6076}$	$\frac{9.9-69.84}{39.39}$	$\frac{1.7-131.2}{46.1}$	$\frac{27.2-2912.0}{990.1}$

Примечание. В числителе – предельные значения, в знаменателе – среднее.

словленным разнотипным содержимым смежных карт, что определяет практически индивидуальные характеристики карттовых фильтратов. В пределах картового поля формируется и относительно глубокий подземный сток, формирующий питание верхнеказанского комплекса. Отсюда постоянно генерируемый объем загрязненных ПВ составляет: $172.7 + 8.31 = 181.01 \text{ м}^3/\text{сут}$.

Производительность подземного трубчатого дренажа, оцененная балансовым и двумя гидродинамическими методами, варьирует в пределах $51.67-102.67 \text{ м}^3/\text{сут}$. Наиболее достоверным, оптимально отвечающим сложившимся природно-техногенным условиям, является значение $73.97 \text{ м}^3/\text{сут}$, полученное на основе формулы Романова. Оно складывается из следующих притоков ($\text{м}^3/\text{сут}$): по северной стороне – 9.66; восточной – 4.32; южной – 46.57; западной – 13.42. Можно считать, что северная дренажная линия перехватывает относительно чистые подземные воды, на которые полигон не оказывает негативного воздействия. В этом случае перехватываемый сток загрязненных грунтовых вод –

$64.31 \text{ м}^3/\text{сут}$ ($67.95 \text{ м}^3/\text{сут}$ при использовании уравнения, учитывающего дополнительное инфильтрационное питание), а не перехватываемый постоянно генерируемый загрязненный подземный сток: $181.01-64.31 = 116.7 \text{ м}^3/\text{сут}$ (1.35 л/с).

Функционирование с 2006 г. всех защитных инженерных сооружений на полигоне привело к тому, что уровни грунтовых вод в 2011 г. в сравнении с 1991 г. практически не изменились, несмотря на усиление их инфильтрационного питания, а в районах северной и южной дренажных линий они даже снизились и в настоящее время по южной стороне особо не отличаются от положения уровней в ненарушенных условиях (рис. 2).

Все дополнительное питание в $35.01 \text{ м}^3/\text{сут}$ перехватывается подземным дренажом. Эти данные наглядно свидетельствуют об эффективности защитных сооружений, особенно по южному флангу полигона, где трубчатый дренаж ориентирован ортогонально линиям тока грунтовых вод. Перехват загрязненных грунтовых вод был бы более масштабным при более глубоком заложении трубчатой дрены. По северной окраине полигона защитные инженерные элементы не столь эффективны. Производительность дренажной линии здесь – $9.66 \text{ м}^3/\text{сут}$, а ПФЗ снижает удельный расход грунтовых вод лишь на $0.01 \text{ м}^2/\text{сут}$ в сравнении с ненарушенными условиями и на $0.04 \text{ м}^2/\text{сут}$ в сравнении с нарушенными условиями во временном интервале до создания дренажей и ПФЗ.

Не перехватываемый дренажной системой, загрязненный карттовыми фильтратами поток грунтовых вод после выхода с полигона начинает самоочищаться. Свидетельством этого является снижение концентраций практически всех компонентов в интервале между 1-м и 2-м поясами наблюдательных скважин. Снижение может достигать одного порядка, реже более. Самоочищению грунтовых вод способствуют следующие основные процессы: разбавление относительно чистым атмосферным питанием (минимальное значение в виде слоя воды – 67.57 мм/год); хеми- и биодеструкция органических веществ, являющихся основными контаминантами; сорбция, диффузионно-дисперсионное рассеяние, выпа-

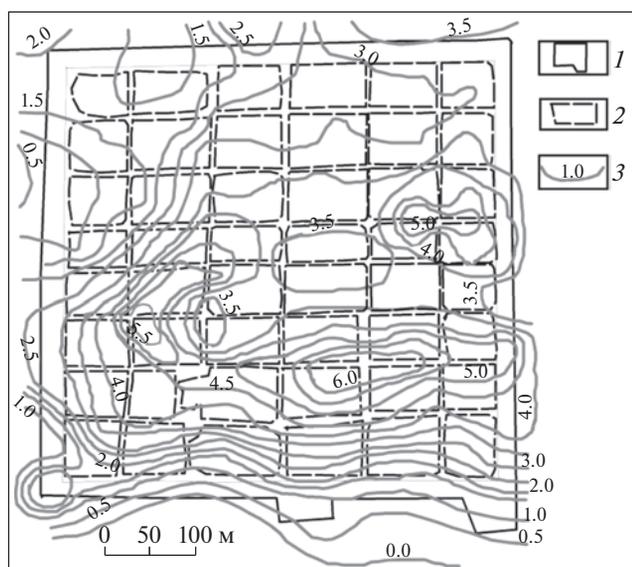


Рис. 2. Превышение уровней грунтовых вод в 2011 г. над их положением в ненарушенных условиях: 1 – ограничение полигона; 2 – контуры карт; 3 – изолинии разницы уровней.

Таблица 6. Наиболее вероятный баланс инфильтрационного питания подземных вод в пределах картового поля полигона

Инфильтрационное питание	Суммарная величина, м ³ /сут	Тип поверхности формирования инфильтрационного питания		
		Грунтовые перемычки между картами	Закрытые (заполненные) карты	Открытые (рабочие и свободные) карты
Современное	129.98	16.01 (12.3%)	76.17 (58.6%)	37.8 (29.1%)
После реконструкции	97.46	95.58 (98.1%)	1.26 (1.3%)	0.62 (0.6%)

дение в осадок по мере изменения рН–Еh условий.

Самоочищение приводит к тому, что на расстоянии 1.0–1.5 км от полигона по направлению фильтрационного потока поверхностные и родниковые воды не несут следов загрязнения, вызванных деятельностью полигона (примерно на такое же расстояние отмечается негативное влияние на гидросферу крупных полигонов твердых бытовых отходов [12]). Глубинный подземный сток – 8.31 м³/сут, питающий в пределах картового поля верхнеказанский комплекс, за счет разбавления чистыми водами с минерализацией не более 0.6 г/л, расход которых на восточной границе полигона составляет 112.5 м³/сут, также не должен вызывать существенных гидрогеоэкологических проблем.

Органическая природа значительной части отходов предопределяет повышенную углекислотную агрессивность картовых фильтратов, которая отражается высокими содержаниями гидрокарбонат-ионов. Концентрация НСО₃⁻ в грунтовых водах полигона при их минерализации 12.75 г/л достигает 8.17 г/л. Это возможно лишь при повышенной парциальной активности углекислого газа, формирующегося за счет деструкции органического вещества отходов. Высокая углекислотная агрессивность определяет более интенсивное взаимодействие картовых фильтратов и самих грунтовых вод в пределах полигона с вмещающим минеральным матриксом и более активное выщелачивание большей части анализированных неорганических компонентов. Интересно и закономерно, что по мере удаления от полигона наиболее интенсивно снижаются концентрации гидрокарбонатов и органических веществ, где последние тесно скоррелированы. Более подробно особенности загрязнения и поведения отдельных компонентов отражены в [4, 13].

Наиболее вероятный водный баланс в постреконструкционном будущем полигона определялся, исходя из типов будущих поверхностей, их площадей, уклонов и коэффициентов фильтрации, необходимых для расчетного определения испарения, поверхностного и подземного стока (см. табл. 4). Со временем должен существенно увели-

читься поверхностный сток (это сток с крайних снивелированных карт и внутрполигонных автодорог, который будет перехватываться дренажными лотками). Подземный сток уменьшится на 32.52 м³/сут (довольно высокая величина прогнозной инфильтрации исходит из условия отсутствия системы поверхностного дренажа по периферии внутренних спланированных карт, при наличии такого дренажа инфильтрация может быть сокращена до 30.48 м³/сут, т.е. до более низкого уровня в сравнении с природными условиями (см. табл. 3)). Это сокращение на 32.52 м³/сут в виде слоя воды составляет 1.52×10^{-4} м/сут или 5.56×10^{-2} м/год.

Эффективная скважность пород зоны аэрации и грунтового водоносного горизонта – 0.1. За 5 лет указанный слой может дать величину снижения напора в бассейновых условиях 2.78 м, наиболее вероятные значения в существующих условиях – 1.5–2.0 м. Такое снижение скорее всего приведет к прекращению работы подземного дренажа и осушению большей части подтопленных карт. Предположительно, днища всех карт станут располагаться выше УГВ через 7 постреконструкционных лет.

Проведение реконструкции скажется не только на положении уровня грунтовых вод, но и на их качестве, так как основной уровень современной инфильтрации проходит непосредственно через карты с отходами, а будущая инфильтрация будет осуществляться через грунтовые перемычки между картами (табл. 6).

Такое питание начнет приводить к постепенному очищению грунтовых вод – снижению их минерализации, общей жесткости, концентраций нефтепродуктов, фенолов и всех остальных компонентов-загрязнителей, так как на грунтовых перемычках может отмечаться лишь сравнительно небольшой объем загрязняющих веществ, присутствующий на них за счет пыления отходов, размещаемых в картах.

Авторы попытались оценить средневзвешенный по расходу состав грунтовых вод на выходе с полигона после проведения реконструкции, базируясь на расходах и наиболее вероятном составе разнотипных вод, смешение которых происхо-

Таблица 7. Сопоставление составов грунтовых вод на выходе с полигона

Временные этапы	Минерализация, мг/л	Жесткость, ммоль/л	Нефтепродукты, мг/л	Фенолы, мг/л	ХПК, мг О ₂ /л
Современный	368–3824	5.0–69.8	0.074–131.2	0.01–2.25	27.2–3883
	1684	19.0–39.0	10.1–46.1	0.46–0.8	1251–1314
Постреконструк- ционное будущее	558.1	8.03	6.38	0.07	151.1

Примечание. Современные данные – по опробованию наблюдательных скважин первого пояса; в числителе – предельные значения, в знаменателе – среднее или преобладающие значения.

дит в картовом поле полигона (грунтовые воды на входном сечении полигона, картовые фильтраты, воды, проинфильтровавшиеся через грунтовые перемычки) (табл. 7).

В постреконструкционном будущем грунтовые воды на выходе с полигона будут отличаться сверхнормативными концентрациями в основном органических веществ. Но они могут быть снижены на порядок в сравнении с современным уровнем содержания. Это положительно скажется и на гидрогеоэкологических условиях ближайшего обрамления полигона.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В последнее время все большее внимание уделяется отходам и полигонам их размещения. Основная цель – уменьшение объема отходов и минимизация их негативного влияния на окружающую среду. Рассмотренный в статье полигон захоронения промышленных отходов в скором времени должен выработать свой ресурс. Его полное заполнение и оставление в существующем виде приведут к сохранению довольно крупного источника загрязнения атмосферы, гидросферы и педосферы на длительный срок, исчисляемый сотнями лет.

Проведение планируемой реконструкции полигона, проект которой разработан в ПИ “Союзхимпромпроект” (г. Казань), позволит минимизировать его негативное влияние на окружающую среду. Влияние на гидросферу, скорее всего, не будет распространяться более чем на 0.5 км от ограничения полигона по направлению тока ПВ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абрамов С.К.* Подземные дренажи в промышленном и городском строительстве. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Стройиздат, 1973. 280 с.
2. *Гольдберг В.М., Скворцов Н.П.* Проницаемость и фильтрация в глинах. М.: Недра, 1986. 160 с.
3. *Красилов В.А.* Охрана природы: принципы, проблемы, приоритеты. М.: Ин-т охраны природы и заповед. дела, 1992. 172 с.
4. *Мусин Р.Х., Курлянов Н.А., Калкаманова З.Г.* О буферных свойствах подземной гидросферы в районах полигонов промышленных отходов // Сергеевские чтения. “Инженерная геология и геоэкология. Фундаментальные проблемы и прикладные задачи”. М.: РУДН, 2016. Вып. 18. С. 520–525.
5. *Небел Б.* Наука об окружающей среде: Как устроен мир. В 2-х т. Т. 1. Пер. с англ. М.: Мир, 1993. 424 с.
6. Отраслевой стандарт. Воды подземные. Классификация по химическому составу и температуре. М.: ВСЕГИНГЕО, 1986. 12 с.
7. Прогноз и предотвращение подтопления грунтовыми водами территорий при строительстве / Под ред. С.К. Абрамова. М.: Стройиздат, 1978. 176 с.
8. Пособие к СНиП 2.06.15-85. Прогнозы подтопления и расчет дренажных систем на застраиваемых и застроенных территориях. М.: Стройиздат, 1991. 272 с.
9. Сайт ПАО “Нижнекамскнефтехим”. URL: <https://www.nknh.ru/> (дата обращения 01.12.2022).
10. Справочное руководство гидрогеолога: в 2 т. 3-е изд., перераб. и доп. Т. 1 / Под ред. В.М. Максимова. Л.: Недра, 1979. 512 с.
11. СТП ВНИИГ 210.01.НТ-2010. Методика расчета гидрологических характеристик техногенно-нагруженных территорий. СПб.: ВНИИГ, 2010. 114 с.
12. Экологические функции литосферы / Под ред. В.Т. Трофимова. М.: Изд-во МГУ, 2000. 432 с.
13. *Musin R.Kh., Kurlyanov N.A., Kalkamanova Z.G., Korotchenko T.V.* Environmental state and buffering properties of underground hydrosphere in waste landfill site of the largest petrochemical companies in Europe // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2016. V. 33. No. 012019.

FEATURES OF THE STRUCTURE, FUNCTIONING AND RECONSTRUCTION OF THE LANDFILL NIZHNEKAMSKNEFTEKHIM PUBLIC JOINT STOCK Co.

R. Kh. Musin^{a,#}, A. R. Galieva^{a,##}, and N. A. Kurlyanov^{b,###}

^a*Kazan Federal University (KFU),
Kremlevskaya ul. 18, Kazan, 420008 Russia*

^b*LLP "Ecostandard "Technical Solutions",
Perevedenovskii per. 13, Moscow, 105082 Russia*

[#]*E-mail: Rustam.Musin@kpfu.ru*

^{##}*E-mail: abdullina_albina94@mail.ru*

^{###}*E-mail: nikitakurlyanov@gmail.com*

PJSC Nizhnekamskneftekhim is one of the largest petrochemical companies in Europe. Industrial production was launched there in 1967. Production waste is stored in a sludge reservoir and waste landfill. The landfill has been operating since 1982. It is equipped with systems of surface and underground drainage, impervious curtains, and two belts of observation wells. More than 0.5 million m³ of mostly solid waste III-V classes of hazard has been accumulated there. The landfill capacity is depleted by more than 80%. Its operation has led to a significant groundwater level rise (4.0–4.5 m) and groundwater pollution, the water salinity reaching 12.75 g/l, and hardness, 73.9 mmol/l. These negative hydrogeoeological effects are primarily due to increased atmospheric recharge of groundwater and the active interaction of atmospheric precipitation with the waste substance. There is plan to reconstruct the landfill. It involves encapsulating the waste in a watertight reservoir confined by artificial geosynthetic materials with extremely low filtration properties. Hydrodynamic and balance methods were used to determine the infiltration supply of groundwater in natural and disturbed conditions, productivity of underground drainage; the continuously formed flow rate of polluted groundwater, which is not intercepted by drainage system (with the flow discharge equal to 116.7 m³/day); as well as modern and predicted (postreconstruction) water balances. The effectiveness of the existing engineering protective structures of the landfill was assessed. It is shown that the planned reconstruction should lead to a decrease in the groundwater level and its pollution degree. In this case, the concentrations of organic substances, which are the priority pollutants, will decrease most intensely. The geological environment of the landfill site is characterized by significant buffer (protective) properties. They control just local spreading of contaminated groundwater. According to the data of numerous different-time sampling at a distance of 1.0–1.5 km from the landfill in the direction of groundwater current spreading, no signs of pollution caused by the landfill operation are registered. The main processes determining the self-purification of groundwater are as follows: dilution of polluted water by pure infiltration nutrition, the minimum layer of which is 67.6 mm/year; chemo- and biodestruction of pollutants, their sorption, diffusion-dispersion scattering and precipitation as pH–Eh conditions change.

Keywords: *landfill, pollution of the hydrosphere, water balance, infiltration recharge of groundwater, self-purification of groundwater*

REFERENCES

1. Abramov, S.K. *Podzemnye drenazhi v promyshlennom i gorodskom stroitel'stve* [Underground drainage in industrial and urban construction]. Moscow, Stroiizdat Publ., 1973, 280 p. (in Russian)
2. Gol'dberg, V.M., Skvortsov, N.P. *Pronitsaemost' i fil'tratsiya v glinakh* [Permeability and filtration in clays]. Moscow, Nedra Publ., 1986, 160 p. (in Russian)
3. Krasilov, V.A. *Okhrana prirody: printsipy, problemy, priority* [Nature conservation: principles, problems, priorities]. Moscow, Institute of nature conservation and nature reserves, 1992, 172 p. (in Russian)
4. Musin, R.Kh., Kurlyanov, N.A., Kalkamanova Z.G. *O bufernykh svoystvakh podzemnoi gidrosfery v raionakh poligonov promyshlennykh otkhodov* [On the buffering properties of the underground hydrosphere in the areas of industrial waste landfills]. *Sergeevskie chteniya. Inzhenernaya geologiya i geoekologiya. Fundamentalnye problemy i prikladnye zadachi*. [Sergeev Readings. Engineering Geology and Geoecology. Fundamental problems and applied tasks]. Moscow, RUDN Publ., 2016, issue 18, pp. 520–525. (in Russian)
5. Nebel, B. *Nauka ob okruzhayushchei srede: kak ustroen mir?* [Environmental science: How does the world work?]. Moscow, Mir Publ., 1993, vol. 1, 424 p. (in Russian)
6. *Otraslevoi standart. Vody podzemnye. Klassifikatsiya po khimicheskomu sostavu i temperature* [Industry Standard. Groundwater. Classification by chemical composition and temperature]. Moscow, Vsesingeo Publ., 1986, 12 p. (in Russian).

7. *Prognoz i predotvrashchenie podtopleniya gruntovymi vodami territorii pri stroitel'stve* [Forecasting and prevention of groundwater flooding of areas during construction]. Moscow, Stroiizdat Publ., 1978, 176 p. (in Russian).
8. *Prognozy podtopleniya i raschet drenazhnykh system na zastraiyaemykh i zastroennykh territoriyakh. Sprav. posobie k SNiP* [Forecasts of flooding and calculation of drainage systems in the built-up and building areas. Reference Manual to SNiP]. Moscow, Stroiizdat Publ., 1991, 272 p. (in Russian).
9. *Sait PAO "Nizhnekamskneftekhim"* [Website of PJSC "Nizhnekamskneftekhim"]. Available at: <https://www.nknh.ru/> (accessed 01.12.2022).
10. *Spravochnoe rukovodstvo gidrogeologa* [Hydrogeologist's Reference Guide]. Moscow, Nedra Publ., 1979, vol. 1, 512 p. (in Russian).
11. *STP VNIIG 210.01.NT-2010. Metodika rascheta gidrologicheskikh kharakteristik tekhnogenno-nagruzhennykh territorii* [Company standard 210.01.NT-2010. Calculation methodology of hydrological characteristics of technogenic-loaded territories]. St. Petersburg, VNIIG Publ., 2010, 114 p. (in Russian).
12. *Ehkologicheskie funktsii litosfery* [Ecological functions of the lithosphere]. Moscow, Moscow St. Univ. Publ., 2000, 432 p. (in Russian).
13. Musin, R.Kh., Kurlyanov, N.A., Kalkamanova, Z.G., Korotchenko, T.V. Environmental state and buffering properties of underground hydrosphere in waste landfill site of the largest petrochemical companies in Europe // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2016, vol. 33, no. 12019. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/33/1/012019>

МЕТОДОЛОГИЯ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 631.6

АНАЛИЗ МЕТОДОВ КАРТОГРАФИРОВАНИЯ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА КАЗАНСКО-ВЕШЕНСКОГО ПЕСЧАНОГО МАССИВА

© 2023 г. Д. И. Арчаков^{1,*}, Т. Я. Турчин^{2,**}

¹ФГБНУ Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения РАН, пр. Университетский, 97, Волгоград, 400062 Россия

²Филиал федерального бюджетного учреждения “Всероссийский научно-исследовательский институт лесоводства и механизации лесного хозяйства” Южно-европейская научно-исследовательская лесная опытная станция, ул. Сосновая, 59 в, станция Вешенская, Шолоховский район, Ростовская обл., 346270 Россия

*E-mail: Archakow777@yandex.ru

**E-mail: t_turchin64@mail.ru

Поступила в редакцию 13.10.2022 г.

После доработки 22.03.2023 г.

Принята к публикации 05.04.2023 г.

В статье рассматриваются два способа классификации спутникового снимка Landsat-8 на примере ключевого участка Казанско-Вешенского песчаного массива Ростовской области. Первый способ – полуавтоматическая классификация растра с обучением (Semi-automatic classification (SC)); второй – нормализованный вегетационный индекс (NDVI). На снимке, согласно типологии по К.Н. Кулику, пески были отклассифицированы по степени зарастания естественной растительностью на открытые, слабозаросшие и заросшие. В отдельные классы были выделены кустарниковая и травянистая (вегетирующая) растительность, лесные культуры сосны, лиственные древостои. Проведен расчет оценки точности дешифрирования полученных картографических изображений по коэффициенту Каппа Коэна. Выполненное исследование необходимо для выявления наиболее достоверного метода дешифрирования выбранной местности. Полученная картосхема может использоваться для первичной оценки состояния фитоекологических условий ландшафта территории песчаного массива. На основе картографических изображений путем установки в каждом классе от 70 до 100 точек и проверки их достоверности составлены матрицы ошибок, на основе которых рассчитана суммарная точность дешифрирования. Для полуавтоматической классификации она равна 80.7%, для NDVI – 74.3%. Коэффициент Каппа Коэна в полуавтоматической классификации с обучением составил 77.4%, NDVI – 70.5%. Разница в точности дешифрирования составила почти 7%. Таким образом, из рассмотренных способов классификации спутникового снимка наилучший результат получен при использовании полуавтоматической классификации с обучением.

Ключевые слова: агроландшафт, пески, ключевой участок, классификация, дешифрирование, коэффициент Каппа Коэна, вегетационный индекс

DOI: 10.31857/S0869780923030025, EDN: WMHVYS

ВВЕДЕНИЕ

Категория песчаных земель является наиболее уязвимой для ведения хозяйственной деятельности. Так, территория Казанско-Вешенского песчаного массива, с момента ее освоения человеком, постоянно подвергалась антропогенной сельскохозяйственной нагрузке. Вследствие нерационального природопользования, неконтролируемой вырубке деревьев и использования земель для хозяйственной деятельности на песчаном массиве стали активно проявляться дефляционные процессы, что способствовало увеличению территории открытых песков, а плодородный слой почвы быстро деградировал [3]. Чтобы предотвратить процессы дефляции и улучшить состоя-

ние песчаных земель и микроклиматических показателей, с 1920-х годов ведутся регулярные исследования по изучению песчаного массива. В результате было установлено, что для замедления процессов деградации почвенно-растительного покрова на песчаных почвах подходит способ создания защитных лесонасаждений из сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris*) и сосны крымской (*Pinus nigra subsp. pallasiana*), так как эти виды хорошо адаптируются в местных почвенно-климатических условиях [2, 5, 6, 8, 14].

Вопрос хозяйственного использования песчаных земель в бассейне Дона и его притоков весьма актуален. В настоящее время для проведения предварительного анализа местности использу-

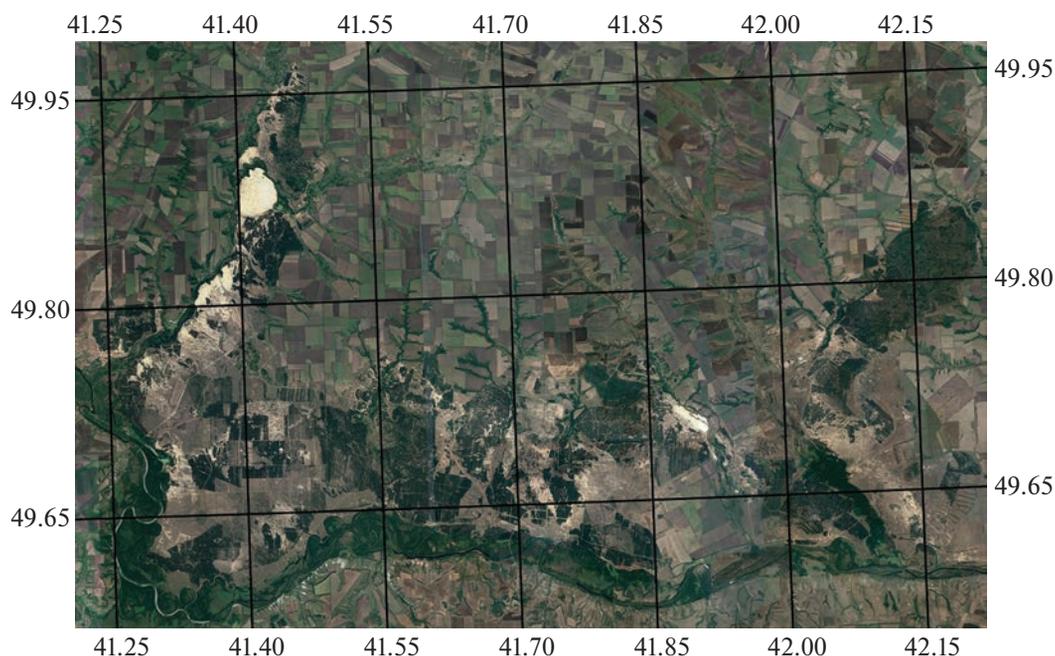


Рис. 1. Казанско-Вешенский песчаный массив. М 1:200000.

ются методы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), которые являются неотъемлемой частью для разработки первичных рекомендаций по оптимизации природопользования на песчаных землях.

В рамках выполнения работы поставлена задача сравнить точность дешифрирования спутниковых снимков Landsat-8 ключевого участка Казанско-Вешенского песчаного массива с помощью двух методов: построение NDVI и полуавтоматической классификации с обучением на снимке в «естественных цветах».

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Казанско-Вешенский песчаный массив, площадь которого составляет около 100000 га (рис. 1), занимает южную оконечность Калачской возвышенности на севере Ростовской области в Верхнедонском и Шолоховском районах, а также Кумылженский район Волгоградской области, с координатами центра 49°68' с.ш., 41°76' в.д. [12].

По климатическому районированию массив относят к Донецко-Донскому району степного климата с неустойчивой зимой и умеренно-засушливым летом. Годовой радиационный баланс положительный и составляет 111–113 ккал/см², его максимум приходится на июнь-июль, а минимум — на декабрь-январь. В зимнее и летнее время года на территории преобладают умеренно-континентальные воздушные массы, повторяемость которых в году составляет 68%, арктических — 11%, тропических — 21%. Амплитуда температуры воз-

духа ярко выражена в течение года. Средняя годовая температура составляет 6,9°C. Самый холодный месяц — январь (–8,8°C), самый теплый — июль (22,6°C). Среднегодовое количество осадков составляет 444 мм. Среднее число дней с осадками 122 за год. Четко выделяются два максимума: в июле (53 мм) и ноябре (41 мм). Большая часть осадков выпадает в летнее время.

Долина р. Дон на данной территории врезана в четвертичные, неогеновые, палеогеновые, меловые и каменноугольные породы. В отложениях кайнозойской эры широко представлены пески (по цвету от белых до ржавых), местами сцементированные в песчаники.

Характерные черты рельефа — равнинность и четкое выделение двух надпойменных террас, которые расположены в субширотном направлении. На I надпойменной террасе рельеф равнинный, на II террасе — бугристо-холмистый.

Казанско-Вешенский песчаный массив расположен в черноземной зоне. Легкие степные почвы песчаного массива азональны. Зональными почвами являются южные черноземы тяжелого механического состава. Материнские породы тяжелых почв водоразделов — элювиальные, делювиальные или эоловые лессовидные суглинки, у легких почв надпойменных террас — это аллювиальные непереветренные или переветренные пески [9].

По комплексному ботанико-географическому районированию район песчаного массива входит в Евразийскую степную область. Степная растительность является зональной, лесная — экстра-

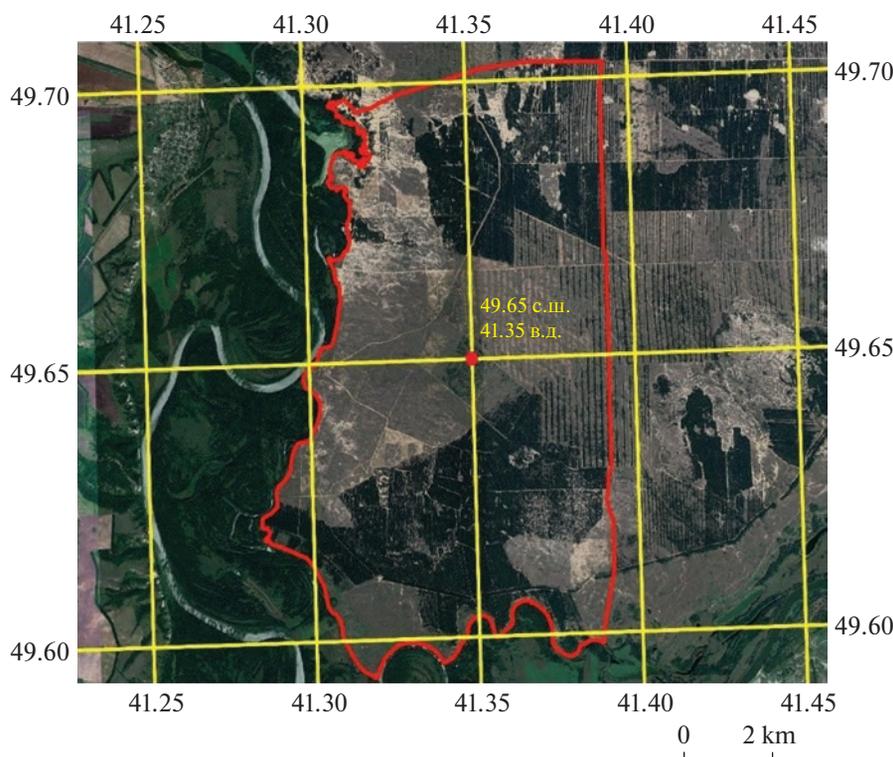


Рис. 2. Ключевой участок на Казанско-Вешенском песчаном массиве, М 1:85000.

зональная. Распространение лесов совпадает с подзоной разнотравно-ковыльных степей, но небольшие лесные участки встречаются и в северной части подзоны типчаково-ковыльных степей [4].

Теоретическое исследование проводилось на ключевом участке, который расположен в юго-западной части Казанско-Вешенского песчаного массива. Площадь участка составляет 7093.6 га с координатами центра 49°.65' с.ш., 41°.35' в.д. (рис. 2).

В работе использовались снимки спутника Landsat-8 с пространственным разрешением 15 м/пиксель в период вегетации растений (дата съемки 07.07.2020 г.). Отдельно классифицировался спутниковый снимок (дата съемки 12.03.2019 г.) для получения информации о площади, занимаемой лесными культурами сосны. Основным критерием выбора изображений служило отсутствие облачности на территории исследуемого участка.

На этапе предварительной обработки спутниковых снимков для устранения различных искажений, внесенных наличием атмосферы, проведена коррекция изображений.

При построении картосхемы ключевого участка применялись два способа: первый – применение полуавтоматической классификации с обучением (SC) по эталонным участкам; второй – полуавтома-

тическое дешифрирование по нормализованному вегетационному индексу (NDVI).

При дешифрировании выделялись следующие классы растительного покрова: открытые пески; слабозаросшие пески; заросшие пески; кустарниковая и травянистая (вегетирующая) растительность; лесные культуры сосны; лиственные древостои. Степень зарастания песков естественной растительностью оценивалась по проективному покрытию: открытые пески – менее 10%; слабозаросшие (включая среднезаросшие) – от 10 до 50%; заросшие – более 50% [11]. В данном разделении изображения спутникового снимка ключевого участка на классы отдельно от заросших песков выделялась травянистая растительность, которая в рассматриваемый временной период находится в стадии вегетации.

В результате классификации полученное растровое изображение переводилось в вектор, а класс “лиственные древостои”, при использовании обоих способов обработки снимков, обрезался по слою лесных культур сосны, полученного в результате обработки снимка, сделанного в период отсутствия вегетации прочей растительности. То есть на летнем снимке лиственные древостои выделяются с культурами сосны. Для оценки точности дешифрирования полученного результата использовался коэффициент Каппа Коэна.

Таблица 1. Критерии оценки вегетационного индекса (NDVI) [10]

Тип объекта	Значение NDVI
Густая растительность	0.7
Разряженная растительность	0.5
Открытая почва	0.025
Облака	0
Снег, лед	-0.05
Вода	-0.25
Искусственные материалы (бетон, асфальт)	-0.5

Таблица 2. Полученные значения вегетационного индекса (NDVI)

Тип объекта	Значение NDVI по снимку	
	07.07.2020 г.	12.03.2019 г.
Открытые пески	0.17–0.22	0.2–0.62
Слабозаросшие пески	0.23–0.34	
Заросшие пески	0.35–0.47	
Кустарниковая и травянистая растительность	0.48–0.64	
Лиственные древостой	0.65–0.91	
Лесные культуры сосны		0.63–0.86

Классификация по первому способу представляет собой выделение классов на спутниковом снимке при помощи обучаемой полуавтоматической классификации, которая заключается в поиске и выделении эталонных участков на снимке. Для наиболее точного выделения эталонов (и соответственно классов) на снимке в “естественных цветах” (синтезирование каналов спектрального диапазона 4-3-2) необходимо визуально проанализировать изображения, полученные в результате синтезирования каналов различного спектрального диапазона, рекомендованные для работы со спутниковыми снимками Landsat-8 [1]:

– 5-4-3 – “искусственные цвета”. Комбинация использовалась для изучения состояния растительного покрова местности. Растительность отображается в оттенках красного, цвет почвы – от темно- до светло-коричневого, открытые пески – белый, пески различной степени зарастания – зелено-голубой цветовой гаммы. Преимуществом данного сочетания каналов является возможность различать хвойные лесонасаждения (темно-красный) от широколиственной растительности. Более светлые оттенки красного обозначают вегетирующую травянистую и кустарниковую растительность. В этой комбинации использовался спутниковый снимок за 12.03.2019 г.;

– 5-6-4 – комбинация представляет собой сочетание ближнего, среднего ИК-каналов и красного видимого канала и позволяет рассмотреть скрытые детали, плохо видимые при использовании комбинации “естественные цвета”. Растительность отображается в различных тонах зеленого, коричневого и оранжевого. Данное синтезирование применялось для выделения на местности открытых, слабозаросших и заросших песков на снимке за 07.07.2020 г.;

– 4-3-2 – отображение космоснимка в “естественных цветах” (RGB). В данном случае использовались каналы видимого для человеческого глаза диапазона, а именно: красный, зеленый и синий. Здоровая растительность – зеленая, больная и прекратившая вегетацию растительность – коричневая или желтая, вода – оттенок темно-синего. Используется для предварительной визуальной оценки местности, но ее недостатком является трудноразличимость одного типа растительности от другого. Использовался только снимок летнего периода.

Второй способ – построение по нормализованному вегетационному индексу (NDVI) – один из самых используемых показателей для числовой оценки качества и количества фотосинтетически активной биомассы. Он базируется на анализе двух наиболее стабильных (не зависящих от прочих факторов) участках спектральной кривой отражения растительности и отличается простотой построения [7]. Высокие показатели индекса указывают на плотный растительный покров, а низкий – на разреженность покрова или же его отсутствие.

NDVI рассчитывается как соотношение между значениями каналов красного (*R*) и ближнего инфракрасного (*NIR*) каналов (*Band*) [7]:

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R}, \tag{1}$$

$$Landsat8NDVI = \frac{Band5 - Band4}{Band5 + Band4}. \tag{2}$$

После расчета полученное изображение классифицировалось на основе критериев оценки вегетационного индекса, представленных в табл. 1, и визуальной оценки спутникового изображения местности (синтезирование каналов 4-3-2).

С учетом особенностей местности рассматриваемого участка (песчаные земли) проведена адаптация изначального типа объекта, а опытным путем в ходе выполнения работы изменены граничные значения индекса для повышения достоверности классификации (табл. 2).

Полученные картографические материалы со спутникового снимка Landsat-8 проверялись на точность дешифрирования на основе архивного спутникового изображения местности в Google Earth за 07.07.2020 г. Одним из самых простых

Таблица 3. Площадь классов растительного покрова на ключевом участке Казанско-Вешенского песчаного массива

Класс	Полуавтоматическая классификация		NDVI	
	Площадь			
	га	%	га	%
Открытые пески	99.8	1.4	351.9	5.0
Слабозаросшие пески	1563.8	22.0	1293.5	18.2
Заросшие пески	1380.7	19.5	1449.0	20.4
Кустарниковая и травянистая растительность	1692.7	31.4	1645.4	31.1
Лесные культуры сосны	2226.9	23.9	2206.2	23.2
Лиственные древостои	129.7	1.8	147.6	2.1
ВСЕГО	7093.6	100	7093.6	100

способов такой проверки является применение коэффициента Каппа Коэна.

Данный способ основан на построении матрицы ошибок, где указывалась как погрешность дешифрирования для каждой категории, так и ошибки, связанные с неверной классификацией. Количество контрольных точек (пикселей) уста-

навливалось согласно методике от 70 до 100 на класс [13, 15, 16].

Оценка точности дешифрирования состоит из нескольких этапов [10]:

1. Расчет суммарной погрешности (overall accuracy):

$$\text{Overall accuracy} = \frac{\text{Total number of correctly classified pixels}}{\text{Total number of reference pixels}} \times 100, \quad (3)$$

где: *Total number of correctly classified pixels (digital)* – общее количество правильно классифицированных пикселей по диагонали в матрице; *Total num-*

ber of reference pixels – общее количество опорных пикселей.

2. Анализ достоверности классификации (Producer's accuracy):

$$\text{Producer's accuracy} = \frac{\text{Number of correctly classified pixels in category}}{\text{Total number of classified pixels in that category}} \times 100, \quad (4)$$

где: *Number of correctly classified pixels in category* – количество правильно классифицированных пикселей в одной из категории; *Total number of classified pixels in that category* – общее количество классифицированных пикселей в одной из категории.

3. Расчет коэффициента Каппа Коэна (Карра coefficient (K)):

$$K = \frac{N \left(\sum_{i=1}^r x_{ii} \right) - \left(\sum_{i=1}^r (x_{i+...} x_{+i}) \right)}{N^2 - \sum_{i=1}^r (x_{i+...} x_{+i})} \times 100, \quad (5)$$

где N – общее количество пикселей; r – количество строк в матрице ошибок; x_{ii} – количество на-

блюдений в строке i и столбце i (по главной диагонали); x_{i+} – общее количество наблюдений в строке i (показано как общее количество точек (в табл. 4, 5 столбец “всего точек на класс, представленные пользователем”)); x_{+i} – общее количество наблюдений в столбце i (показано как общее количество в нижней части матрицы (в табл. 4, 5 строка “итоговое количество точек на класс”)).

Для оценки полученных результатов использовалась следующая шкала: менее 40% – плохо, необходимо переклассифицировать изображение; от 40 до 75% – хорошо, картосхему можно переклассифицировать в зависимости от разрешения спутникового снимка и требований выполняемой задачи; более 75% – отлично, классификация проведена наиболее точно [17].

Таблица 4. Матрица ошибок. Полуавтоматическая классификация раstra

Класс	1	2	3	4	5	6	Всего точек на класс, поставленные пользователем
1	46	24	0	0	0	0	70
2	8	80	12	0	0	0	100
3	0	14	82	4	0	0	100
4	0	0	21	72	7	0	100
5	0	0	0	6	94	0	100
6	0	0	0	8	0	62	70
Итоговое количество точек на класс	54	128	115	90	101	62	80.7%

Примечание (здесь и в табл. 5). 1 – открытые пески; 2 – слабозаросшие пески; 3 – заросшие пески; 4 – кустарниковая и травянистая растительность; 5 – сосновые лесонасаждения; 6 – естественные леса и колки).

Таблица 5. Матрица ошибок. NDVI

Класс	1	2	3	4	5	6	Всего точек на класс, поставленные пользователем
1	40	30	0	0	0	0	70
2	4	64	30	2	1	0	100
3	0	12	73	15	2	0	100
4	0	1	19	72	7	0	100
5	0	1	4	1	94	0	100
6	0	0	1	11	0	58	70
Итоговое количество точек на класс	44	78	127	101	104	58	74.3%

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На ключевом участке представлены 6 классов растительного покрова: открытые, слабозаросшие пески, заросшие пески, травянистая (вегетирующая) и кустарниковая растительность, лесные культуры сосны, лиственные древостои. Стоит отметить, что в рассматриваемой зоне полностью отсутствуют асфальтированные дороги, коммуникации, путепроводы и различные строения, что, в свою очередь, является положительным фактором при классификации местности, так как уменьшается количество классов, соответственно и погрешность дешифрирования. Результат классификации представлен на рис. 3.

На основе полученных изображений была составлена таблица для сравнительного анализа площади, занимаемой каждым классом (табл. 3).

В классе открытых песков разница в площади между двумя методами классификации раstra составляет 252 га или 3.6%. Слабозаросшие пески различаются на 270.8 га. Заросшие пески занимают большее пространство при использовании NDVI, а именно 1449.0 га, что на 0.9% больше, чем в по-

луавтоматической классификации (68.3 га). В оставшихся трех классах наблюдаются небольшая разница по соотношениям занимаемой площади: в кустарниковой и травянистой растительности она составила 47.3 га, лесных культурах сосны – 20.7 га, лиственных древостоях – 17.9 га.

Таким образом, самые большие различия отмечены в трех классах песков, данное явление обусловлено применением разных методик классификации растрового изображения местности. Если при первом способе пользователь сам выбирает и задает эталоны классов на основе использования различных комбинаций каналов, то при использовании NDVI необходимо корректировать значения индекса для достижения максимальной точности дешифрирования спутникового снимка. Также, как отмечалось выше, для получения наиболее точных данных по культурам сосны использовался снимок за 12.03.19 г., что позволило с наименьшей погрешностью выделить классы кустарников и травянистой растительности; лиственные древостои.

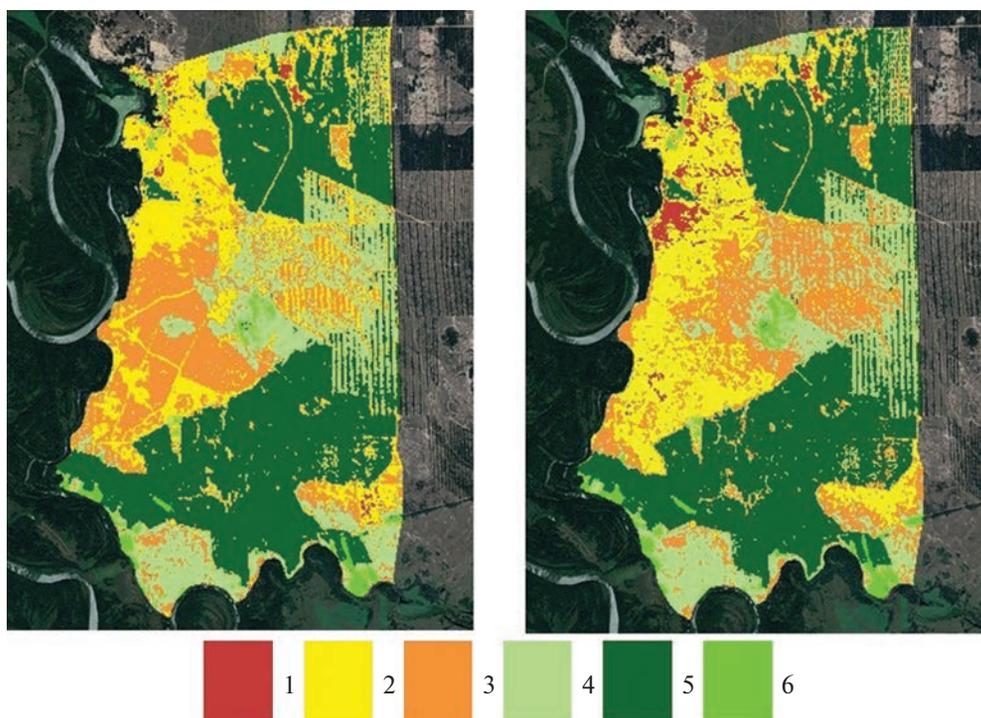


Рис. 3. Результат классификации ключевого участка Казанско-Вешенского песчаного массива: а – нормализованный вегетационный индекс (NDVI) М 1:50000; б – полуавтоматическая классификация (SC) М 1:50000. 1 – открытые пески; 2 – слабозаросшие пески; 3 – заросшие пески; 4 – кустарниковая и травянистая растительность; 5 – лесные культуры сосны; 6 – лиственные древостои.

На основе полученных данных составлена матрица ошибок для проверки точности дешифрирования при использовании способа полуавтоматической классификации (табл. 4).

Суммарная погрешность рассчитывается путем суммирования по диагонали количества правильных точек из каждого класса и делится на общее количество пикселей, предоставленных пользователем (540 точек). При использовании данного способа общий процент точности составил 80.7%, что является отличным результатом. По матрице ошибок при использовании полуавтоматической классификации основная часть ошибок приходится на открытые, слабозаросшие и заросшие пески, а также на класс кустарниковой и травянистой растительности. Данный факт объясняется тем, что при выделении эталонных участков на снимке в “естественных цветах” некоторые пиксели могут находиться в одном и том же цветовом диапазоне, следовательно, они будут относиться только к одной из выделенных категорий. Повышает погрешность и пространственное разрешение спутникового снимка (15 м/пиксель.)

В матрице по нормализованному вегетационному индексу точность дешифрирования спутникового снимка составила 74.3%, что на 6.4% меньше, чем

при первом способе (табл. 5). При использовании NDVI классы растительного покрова, у которых наблюдается наибольшая погрешность, остались те же. Но в данном случае это связано с тем, что даже несмотря на изменение граничных значений, разрешение спутникового снимка не позволяет повысить точность классификации. Особенно сильно выделяются классы открытых и слабозаросших песков (30 и 33 неправильных точек).

Сводные данные для оценки достоверности дешифрирования растрового изображения по двум способам классификации представлены в табл. 6. Классы открытых и слабозаросших песков точнее определялись через нормализованный вегетационный индекс. В первом случае разница составила 5.7%, а во втором – 16.6%. При этом заросшие пески с наименьшей погрешностью определились в полуавтоматической классификации, разница составила 13.8%. Также NDVI уступает по достоверности дешифрирования в кустарниковой и травянистой растительности на 8.7% и лесных культур сосны – на 2.6%. В то же время по обоим способам классификации лиственные древостои определились на 100%.

На основе полученных данных по матрице ошибок был произведен расчет коэффициента Каппа Коэна для полуавтоматической классифи-

Таблица 6. Достоверность классификаций

Элемент ландшафта (класс)	Полуавтоматическая классификация, %	NDVI, %
Открытые пески	85.2	90.9
Слабозаросшие пески	62.5	82.1
Заросшие пески	71.3	57.5
Травянистая и кустарниковая растительность	80.0	71.3
Лесные культуры сосны	93.0	90.4
Лиственные древостои	100	100

кации раstra (SC) и нормализованного вегетационного индекса (NDVI):

$$K_{SC} \frac{192020}{248180} \times 100 = 77.4\%, \quad (6)$$

$$K_{NDVI} \frac{179380}{254440} \times 100 = 70.5\%. \quad (7)$$

Таким образом, по данному коэффициенту метод полуавтоматической классификации растровых изображений оказался точен на 77.4%, что на 3.3% меньше, если считать по формуле суммарной погрешности. Точность классификации по NDVI равна 70.5%, что на 3.8% меньше, чем первоначальный результат оценки. В целом разница между двумя способами составила 6.9%.

ВЫВОДЫ

В результате классификации спутникового снимка Landsat-8 для ключевого участка Казанско-Вешенского песчаного массива был проведен расчет площадей, занимаемых каждым классом растительного покрова. Наибольшие отличия при применении двух разных методов дешифрирования заключаются в трех категориях песков: открытые (1.4–5.0% площади), слабозаросшие (8.2–22.0%), заросшие (19.5–20.4%).

На основе полученных картосхем, путем установки в каждом классе от 70 до 100 точек и проверки их достоверности с помощью архивного спутникового изображения были составлены матрицы ошибок, которые позволили рассчитать суммарную погрешность (Overall accuracy). Для полуавтоматической классификации она составила 80.7%, для NDVI – 74.3%. При этом по вегетационному индексу с меньшей погрешностью определились классы “открытые пески” и “слабозаросшие пески”, в остальных случаях метод SC оказался точнее.

Коэффициент Каппа Коэна для полуавтоматической классификации с обучением составил 77.4%, что является отличным результатом. Для NDVI коэффициент равен 70.5%, что является

хорошим результатом. Разница в точности классификации составила 6.9%.

Учитывая полученный результат, в дальнейшем планируется продолжение работы по оценке точности дешифрирования спутниковых снимков песчаных земель, которая будет включать совмещение двух способов дешифрирования, рассмотренных в статье; использование данных со спутника Sentinel-2 с пространственным разрешением 10 м/пиксель; изучение и апробацию “ландшафтного индекса песчаных земель” на песках Среднего Дона.

Работа выполнялась в рамках государственного задания по теме НИР № FNFE-2022-0011 “Разработка новой методологии оптимального управления биоресурсами в агроландшафтах засушливой зоны РФ с использованием системно-динамического моделирования почвенно-гидрологических процессов, комплексной оценки влияния климатических изменений и антропогенных нагрузок на агробиологический потенциал и лесорастительные условия”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Адамович Д.А., Ашихмина Т.Я., Кантор Г.Я.* Теоретические проблемы экологии. Использование различных комбинаций спектральных каналов космических снимков спутника Landsat-8 для оценки природных сред и объектов (обзор) // Теоретическая и прикладная экология. 2012. № 2. С. 9–18.
2. *Гаель А.Г.* Облесение бугристых песков засушливых областей. М.: Государственное изд-во географической литературы, 1952. 218 с.
3. *Гаель А.Г., Гумилев Л.Н.* Разновозрастные почвы на песках Дона и передвижение народов за исторический период // Известия АН СССР, Сер. геогр. 1966. № 1. С. 11–20.
4. *Грибова С.А., Исаченко Т.И., Лавренко Е.М.* Растительность европейской части СССР. Л.: Наука, 1980. 429 с.
5. *Гумилев, Л.Н.* Древняя Русь и Великая степь. М.: Эксмо, 2006. 508 с.
6. *Дубнянский А.В.* Пески Среднего Дона. М.: СельхозГИЗ, 1949. 227 с.
7. *Замалитдинова М.Г., Ткачева И.П., Ергалиев Д.С., Сейткожина А.* Исследование изменения расти-

- тельности в зоне Аральского моря на основе космических снимков с использованием вегетационного индекса NDVI // Вестник Евразийского национального университета имени Л.Н. Гумилева. 2019. № 3. С. 32–38.
8. Зюзь Н.С. Культуры сосны на песках Юго-Востока. М.: Агропромиздат, 1990. 155 с.
 9. Ивлиева О.В., Райчева А.В. Физико-географические условия Шолоховского района // Природа Государственного музея-заповедника М.А. Шолохова: сб. статей. Ростов-на-Дону: ООО “Ростиздат”, 2000. С. 18–26.
 10. Королева П.В., Рухович Д.И., Рухович А.Д. Местоположение открытой поверхности почвы и линии почвы в спектральном пространстве RED-NIR // Почвоведение. 2017. № 12. С. 1435–1446.
 11. Кулик К.Н. Агролесомелиоративное картографирование и фитоэкологическая оценка аридных ландшафтов. Волгоград: ВНИАЛМИ, 2004. 248 с.
 12. Макушкин П.И., Турчин Т.Я., Макушкина И.П. Оценка санитарного состояния аренных дубняков Казанско-Вешенского песчаного массива // Приоритетные направления развития науки и образования: сб. статей II Междунар. научно-практ. конференции. 2018. С. 77–83.
 13. Малышева Н.В. Автоматизированное дешифрирование аэрокосмических изображений лесных насаждений. М.: Московский государственный университет леса, 2012. 151 с.
 14. Миронов В.В. Облесение песков Юго-Востока. М.: Лесная промышленность, 1970. 168 с.
 15. Файзуллоев Ш.А. Оценка точности классификации данных дистанционного зондирования в ГИС-технологии на примере района каскада ГЭС на реке Вахш // Известия науки республики Таджикистан. Отделение физико-математических, химических, геологических и технических наук. 2020. № 1 (178). С. 96–103.
 16. Congedo Luca. Semi-Automatic Classification Plugin. A python tool for the download and processing of remote sensing images in QGIS. Journal of open Source Software [Электронный ресурс]. 2012. № 6 (64). 197 p. <https://doi.org/joss.03172> (дата обращения 24.03.22).
 17. Landis J.R., Koch G.G. The measurement of observer agreement for categorical data. Biometrics [Электронный ресурс]. 1977. № 33 (1). P. 159–174. <https://doi.org/10.2307/2529310>

ANALYSIS OF METHODS FOR MAPPING THE VEGETATION COVER AT THE KAZAN-VESHENSKY SAND MASSIF

D. I. Archakov^{a,#} and T. Ya. Turchin^{b,##}

^a*Federal Scientific Centre of Agroecology, Complex Amelioration and Protective Afforestation, Russian Academy of Sciences, Universitetskii pr. 97, Volgograd, 400062 Russia*

^b*Branch of the Federal Budgetary Institution All-Russian Research Institute of Forestry and Forestry Mechanization, South European Research Forest Experimental Station, ul. Sosnovaya, 59v, vil. Veshenskaya, Sholokhov district, Rostov-on-Don region, 346270 Russia*

[#]*E-mail: Archakow777@yandex.ru*

^{##}*E-mail: t_turchin64@mail.ru*

The article discusses two different ways to classify space images of Landsat-8 satellite by the example of the sand massif in the Kazan-Veshensky key area, the Rostov-on-Don region. The first method is a semi-automatic raster classification with training (SC) of selected reference areas, the second is a normalized vegetation index (NDVI). Taking into consideration K.N. Kulik typology of sands, the following classes are distinguished in the satellite image, i.e., open, slightly overgrown and overgrown sands. Also, shrub and herbaceous (plants in the vegetative state), pine forest plantations, and native forest with tree splits were marked as individual classes. The degree of sand overgrowth with native vegetation was estimated according to the projective cover. The resulting raster images were vectorized for further work. The estimation of cartographic image classification accuracy by the Cohen's Kappa index was calculated. This work is necessary to identify the most reliable method for deciphering the selected area images. The resulting map can be used for initial assessment of phytocological conditions of agrolandscapes in the sandy massif area. On the basis of cartographic images, by setting from 70 to 100 points in each class and checking their reliability by using archival satellite image for 07.07.2020, error matrices were compiled, which permitted us to calculate the total interpretation accuracy. For semi-automatic classification with training, it constitutes 80.7%, and NDVI – 74.3%. According to the vegetation index with a smaller error, the classes of open sands and weakly overgrown sands were distinguished, in other cases the SC method turned out to be more accurate. Cohen's Kappa coefficient in the semi-automatic classification with training is 77.4%, NDVI – 70.5%. The difference in classification accuracy is almost 7%. Thus, the optimal method for preliminary analysis of the Kazan-Veshensky sand massif key area using Landsat-8 satellite images is a semi-automatic classification with training.

Keywords: *agrolandscape, sands, key area classification, deciphering, Cohen's Kappa index, vegetation index*

REFERENCES

1. Adamovich, D.A., Ashikhmina, T.Ya., Kantor, G.Ya. *Teoreticheskie problemy ekologii. Ispol'zovanie razlichnykh kombinatsii spektral'nykh kanalov kosmicheskikh snimkov sputnika Landsat-8 dlya otsenki prirodnykh sred i ob'ektov (obzor)* [The use of various combinations of spectral channels of space images from Landsat 8 satellite for assessing natural environments and objects (review)]. *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya*, 2012, no. 2, pp. 9–18. (in Russian)
2. Gael, A.G. *Oblesenie bugristykh peskov zasushlivykh oblastei* [Afforestation of hilly sands in arid regions]. Moscow, Gosudarstvennoe izdatel'stvo geograficheskoi literatury, 1952, 218 p. (in Russian)
3. Gael, A.G., Gumilev, L.N. *Raznovozrastnye pochvy na peskakh Dona i peredvizhenie narodov za istoricheskii period* [Soils of different ages on the Don River sands and migration of peoples over the historical period]. *Izvestiya Akademii Nauk SSSR. Geografiya*, 1966, no. 1, pp. 11–20. (in Russian)
4. Gribova, S.A., Isachenko, T.I., Lavrenko, E.M. *Rastitel'nost' evropeiskoi chasti SSSR* [Vegetation in the European part of the USSR]. Leningrad, Nauka Publ., 1980, 429 p. (in Russian)
5. Gumilev, L.N. *Drevnyaya Rus' i Velikaya step'* [Ancient Russia and the Great Steppe]. Moscow, Eksmo Publ., 2006, 508 p. (in Russian)
6. Dubnyanskii, A.V. *Peski Srednego Dona* [Sands of the Middle Don River]. Moscow, SelkhozGIZ Publ., 1949, 227 p. (in Russian)
7. Zamalitinova, M.G., Tkacheva, I.P., Ergaliev, D.S., Seitkozhina A. *Issledovanie izmeneniya rastitel'nosti v zone Aral'skogo morya na osnove kosmicheskikh snimkov s ispol'zovaniem vegetatsionnogo indeksa NDVI* [Study of vegetation changes in the Aral Sea area based on satellite images using the vegetative index NDVI]. *Vestnik Evraziiskogo natsional'nogo universiteta im. L.N. Gumileva*, 2019, no. 3, pp. 32–38. (in Russian)
8. Zyuz, N.S. *Kul'tury sosny na peskakh Iugo-Vostoka* [Pine cultures on sands of the South-East]. Moscow, Agropromizdat Publ., 1990, 155 p. (in Russian)
9. Ivlieva, O.V., Raicheva, A.V. *Fiziko-geograficheskie usloviya Sholokhovskogo raiona* [Physico-geographical conditions in the Sholokhov district]. *Priroda gosudarstvennogo muzeya-zapovednika M.A. Sholokhova* [Nature of the Sholokhov state museum reserve]. Collection of articles. Rostov-on-Don, Rostizdat Publ., 2000, pp. 18–26. (in Russian)
10. Koroleva, P.V., Rukhovich, D.I., Rukhovich, A.D. *Mestopolozhenie otkrytoi poverkhnosti pochvy i linii pochvy v spektral'nom prostranstve RED-NIR* [Location of open soil surface and soil line in the RED-NIR spectral space]. *Pochvovedenie*, 2017, no. 12, pp. 1435–1446. (in Russian)
11. Kulik, K.N. *Agrolesomeliativnoe kartografirovaniye i fitoekologicheskaya otsenka aridnykh landshaftov* [Agroforest ameliorative mapping and phyto-ecological estimation of arid landscapes]. Volgograd, VNIALMI, 2004, 248 p. (in Russian)
12. Makushkin, P.I., Turchin, T.Ya., Makushkina, I.P. *Otsenka sanitarnogo sostoyaniya arennykh dubnyakov Kazansko-Veshenskogo peschanogo massiva* [Evaluation of the sanitary state of arenum oak banks in the border of Kazansko Veshensky sandy massif]. *Prioritetnyye napravleniya razvitiia nauki i obrazovaniya: sbornik statei II Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Priority directions in science and education development. Proc. II Intern. Sci.- Pract. Conference]. 2018, pp. 77–83. (in Russian)
13. Malysheva, N.V. *Avtomatizirovannoe deshifrirovaniye aerokosmicheskikh izobrazhenii lesnykh nasazhdenii* [Automated interpretation of aerospace images of forest plantations]. Moscow, Moskovskii gosudarstvennyi universitet lesa, 2012, 151 p. (in Russian)
14. Mironov, V.V. *Oblesenie peskov Iugo-Vostoka* [Afforestation of the South-East sands]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1970, 168 p. (in Russian)
15. Faizulloev, Sh.A. *Otsenka tochnosti klassifikatsii dannykh distantsionnogo zondirovaniya v GIS-tehnologii na primere raiona kaskada GES na reke Vakhsh* [Classification accuracy assessment of remote sensing data in GIS technology, a case study of the HPP cascade area on the Vakhsh River]. *Izvestiya nauki respubliki Tajikistan. Otdelenie fiziko-matematicheskikh, khimicheskikh, geologicheskikh i tekhnicheskikh nauk*, 2020, no. 1 (178), pp. 96–103. (in Russian)
16. Congedo, Luca. Semi-automatic classification Plugin. A python tool for the download and processing of remote sensing images in QGIS. *Journal of Open Source Software* [Electronic resource]. 2012, no. 6 (64). 197 p. <https://doi.org/joss.03172>. (accessed 24.03.22)
17. Landis, J.R., Koch, G.G. The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics* [Electronic resource]. 1977, no. 33 (1), pp. 159–174. <https://doi.org/10.2307/2529310>. (accessed 04.02.22)

ДВАДЦАТЬ ЧЕТВЕРТЫЕ “СЕРГЕЕВСКИЕ ЧТЕНИЯ”. ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ И ПРИКЛАДНЫЕ ВОПРОСЫ ИНЖЕНЕРНОЙ ГЕОДИНАМИКИ

DOI: 10.31857/S0869780923030050, EDN: WMVWPE

Второй год подряд годичная сессия Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии – научная конференция “Сергеевские чтения” – проводится вне г. Москвы в качестве выездного расширенного тематического заседания Научного совета по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии РАН. В 2023 г. конференция XXIV “Сергеевские чтения” была проведена 30–31 марта в г. Казани. Кроме постоянных организаторов чтений – Института геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН и Научного совета РАН – помощь в подготовке и проведении конференции оказала кафедра общей геологии и гидрогеологии Казанского (Приволжского) федерального университета при спонсорской поддержке ООО “Геоинжсервис” и ООО “Геоцентр МГУ”.

В развитие научной тематики, начатой в 2022 г. с обсуждения современных проблем грунтоведения как одного из основных разделов инженерной геологии, организаторы XXIV “Сергеевских чтений” предложили обратиться к фундаментальным и прикладным вопросам другой неотъемлемой составляющей инженерной геологии – инженерной геодинамики. Разумеется, инженерную геодинамику нельзя рассматривать в отрыве ни от других направлений инженерной геологии (грунтоведения и региональной инженерной геологии), ни от других областей наук о Земле в целом. Развитие различных геодинамических процессов во многом определяется составом и свойствами грунтов, формирующими геологическую среду. В связи с этим, как отметил в предисловии к сборнику трудов конференции член редколлегии издания А.Л. Стром, доклады, представленные на конференцию, охватили чрезвычайно широкий круг вопросов – от описания региональных особенностей проявления и развития различных геодинамических процессов, как эндогенных (сейсмичность, движения по активным разломам), так и экзогенных (оползни, карст, сели, суффозия), до проявления тех или иных геологических процессов на участках строительства конкретных сооружений. Многие доклады, опубликованные в сборнике и оглашенные на конференции устно, касались изучения проблем на

стыке инженерной геодинамики и грунтоведения, региональной инженерной геологии, геологии нефти и газа, сейсмологии, геохимии, гидрогеологии. Актуальности их обсуждения способствовал выбор столицы Республики Татарстан в качестве места проведения чтений – региона, для которого характерны проявления различных геодинамических процессов, как природного (карст, оползни по берегам рек Волга и Кама), так и антропогенного генезиса (например, землетрясения, связанные с разработкой месторождений нефти и газа).

Из 77 докладов, одобренных редколлегией и опубликованных в сборнике трудов XXIV “Сергеевских чтений”, за два дня работы конференции было заслушано 40 сообщений в рамках 1 пленарного и 6 секционных заседаний. Темы секционных заседаний были сформулированы следующим образом: 1) развитие теоретических основ инженерной геодинамики; 2) вопросы эндогенной геодинамики в инженерной геологии; 3) изучение опасных склоновых процессов; оценка их опасности и риска; 4) моделирование при решении задач инженерной геодинамики; 5) природные и антропогенные процессы как фактор формирования инженерно-геологических условий территории; 6) гидрогеоэкологические аспекты инженерной геодинамики; 7) методика изучения и мониторинга природных и антропогенных процессов; дистанционные методы исследования в инженерной геодинамике.

Пленарное заседание “Сергеевских чтений” открыл директор ИГЭ РАН проф. д.г.-м.н. Е.А. Вознесенский. По традиции с приветственным словом к собравшимся обратился научный руководитель ИГЭ РАН, председатель Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии, академик В.И. Осипов, который, будучи инициатором организации ежегодных “Сергеевских чтений” в качестве годичной сессии Научного совета РАН в 1998 г., вот уже четверть века остается неизменным председателем оргкомитета этого мероприятия. Далее пленарное заседание продолжилось обсуждением крупных теоретических вопросов в рамках объявленной научной тематики.

С докладом о теоретических проблемах и современных задачах инженерной геодинамики от имени коллектива авторов кафедры инженерной и экологической геологии геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова выступил ведущий научный сотрудник лаборатории инженерной геодинамики и обоснования инженерной защиты территорий О.В. Зеркаль. В его докладе была показана разница в подходах к трактовке роли и места инженерной геодинамики при решении инженерно-геологических задач в работах отечественных и зарубежных ученых. Автором обосновано, что основной методологической задачей, стоящей перед отечественной инженерной геодинамикой на современном этапе, является переход от классической парадигмы инженерной геологии к парадигме, основанной на риск-анализе, теории приемлемого риска, ориентированной на вероятностный анализ развития геологических и инженерно-геологических процессов. При этом трактовка инженерной геодинамики как науки должна, по мнению автора, базироваться на принципе историзма в рамках естественно-исторического подхода в геологии, подразумевающим изучение процессов в геологической истории их развития. Эту мысль О.В. Зеркаль развил и конкретизировал на примере оползневой процесса в другом докладе “Особенности оползней как объектов изучения”, в котором утверждал, что теоретической основой методологии изучения оползней в рамках геодинамического подхода следует принять представление об оползне *“как естественно-историческом геологическом объекте, подготовка к смещению которого происходит в геологическом времени, в то время как собственно смещение может протекать в физическом времени, в результате которого формируется новый геологический объект”*. При этом сам термин “оползень”, по мнению автора, является *“сложным, многоаспектным, полисемантическим, трактовка которого зависит от используемого концептуального подхода — геологического, геодинамического, геотехнического, геоморфологического или ландшафтного”*.

Интересная теоретическая интерпретация новых расчетных данных, полученных д.т.н. Г.П. Постоевым, к.г.-м.н. А.И. Казеевым, М.М. Кучуковым (ИГЭ РАН, Москва), была изложена в докладе “Геологический критерий 0.009 в развитии геодинамических процессов”. С позиций представлений о диссипативных геологических структурах, формирующихся в геологической среде на участках проявления экзогенных геологических процессов, авторы поставили задачу разработать расчетную схему, которая в меру достоверно учитывала бы природные условия, механизм и закономерности развития геологических процессов, определяющих особенности изменения напряженно-деформированного состояния (НДС) и в конечном итоге — разрушительные деформации геоло-

гического массива. Исследователи обосновывают ввод количественного геологического критерия в расчеты, определяющего изменения НДС геологической среды при развитии геодинамических процессов и подготовке разрушительных деформаций (оползневых блоков, провалов над подземной полостью, выпоров грунтового основания).

По окончании пленарной сессии работа XXIV “Сергеевских чтений” продолжилась секционными заседаниями. Рассмотрение вопросов эндогенной геодинамики в инженерной геологии началось с доклада д.г.-м.н. А.Л. Строма (ООО “Центр геодинамических исследований”, Москва) в соавторстве с к.ф.-м.н. М.Ю. Темисом (ООО “П2Т Инжиниринг”, Москва) “Активные разломы, пересекающие трассы линейных сооружений: неопределенности при оценке параметров подвижек и возможные инженерные решения”. Рассматривая примеры пересечения тектонических разрывов с магистральными трубопроводами, последствия разрушения которых могут иметь очень тяжелые экономические и экологические последствия, авторы показывают, что при изысканиях принципиально важно, в первую очередь, определить тип подвижки по разлому, а также пороговые значения подвижек в проекции на ось трубопровода, которые будут требовать разных конструктивных решений по защите трубопровода от разрыва.

Большой интерес аудитории вызвал доклад д.г.-м.н. П.С. Микляева (ИГЭ РАН, Москва), который представил новые результаты исследования радоновых аномалий в зонах активных разломов, выполненных коллективом авторов из ИГЭ РАН, МГУ им.М.В. Ломоносова и Пятигорского филиала Северо-Кавказского федерального университета. Изучение радоновых аномалий в зоне активного разлома на горе Бештау дало авторам основание заключить, что мощные радоновые аномалии в зонах разломов, проявляющиеся сезонно, обусловлены не глубиной разгрузкой “геогаза” из недр, а процессом конвективной циркуляции атмосферного воздуха в приповерхностной проницаемой части разломной зоны. П.С. Микляев делает вывод, что схожесть сезонных колебаний уровней ^{222}Rn во многих радоновых аномалиях, связанных с активными разломами в разных геологических, тектонических и климатических условиях, свидетельствует о том, что описанный в докладе механизм концентрации радона возможно развит значительно шире, чем это считалось ранее.

Различные аспекты влияния эндогенных геодинамических процессов на инженерные сооружения в различных тектонических условиях платформенных областей были затронуты в сообщениях И.В. Бондаря и Н.А. Гордеева (ИФЗ РАН, Москва), а также Я.Г. Аухатова (ООО “ЦСМР

нефть” при АН Республики Татарстан, Казань). Учет воздействия надвиговых подвижек, зачастую сопровождающихся микросейсмичностью, важен при проектировании трасс магистральных трубопроводов, открытых и закрытых горных выработок, эксплуатационных скважин по добыче углеводородов.

Насыщенное интересными докладами секционное заседание “Сергеевских чтений” было посвящено также изучению и оценке опасности и риска склоновых процессов. Исследованию опасных склоновых процессов, развивающихся в разных районах страны, всегда уделяется повышенное внимание инженер-геологов, и эта проблематика традиционно является приоритетной среди других исследований геодинамических процессов. Склоновые процессы представляют особую опасность в горных районах, где оползни в сочетании с селями и другими гравитационными процессами приобретают катастрофический характер и приводят к большому материальному ущербу. Мониторингу активизации оползня “Бузулган”, провоцирующей сход селевых потоков в центральной части Пшекиш-Тырныаузской тектонической зоны в долине р. Герхожан-Су (одна из самых селеопасных территорий в России), посвящены совместные исследования геологов и географов МГУ им. М.В. Ломоносова (О.В. Зеркаль, С.С. Черноморец и Е.А. Савернюк). Оползневые процессы, развивающиеся в сейсмически активном Кавказском регионе, обсуждались также в докладе А.Л. Строма, И.К. Фоменко, О.В. Зеркаля (ООО “Центр геодинамических исследований”, РГГРУ, МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва). Авторы доклада рассмотрели распространение скальных оползней в так называемом Известняковом Дагестане, исследовали их возможную связь с сейсмичностью и возникающие в связи с этим противоречия. Для разрешения последних, по мнению А.Л. Строма, необходимо провести картирование крупных скальных оползней на всей изучаемой территории и составить базу данных для статистического анализа соотношений между различными их параметрами. Особый интерес слушателей и активное обсуждение вызвал доклад д.г.-м.н. Ю.В. Фроловой (МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва) “Гидротермальные преобразования пород как фактор развития оползневых процессов в геотермальных районах Курило-Камчатского региона”. Ею показано, что развитие опасных склоновых процессов в этом сейсмически активном регионе молодого орогенеза, в пределах которого проявляется максимальное разнообразие геодинамических процессов, связано с гидротермальной переработкой (аргиллизацией) горных пород, что сопровождается их разуплотнением и резким снижением прочностных и деформационных свойств. Эти региональные особенности должны учитываться при

планировании инженерно-хозяйственной деятельности и туристических маршрутов в геотермальных районах.

Ряд докладов, представленных на конференции, касался исследования оползневых деформаций, развивающихся на берегах рек в платформенных условиях: на восточной окраине Приволжской возвышенности в долине р. Волга, (А.И. Латыпов, КазГУ, Казань), а также в долине р. Москва в черте столицы. Так, М.П. Кропоткин и А.А. Прасолов (МГСУ, ООО “Инженерная геология и геотехника”, Москва) изучили влияние переуплотнения грунтов на развитие оползней в Москве, а коллектив авторов геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова (П.Н. Новиков, И.В. Аверин и др.) изложили новые данные о строении оползневого массива на Карамышевской набережной.

В отдельную секцию на конференции были объединены доклады, посвященные моделированию при решении задач инженерной геодинамики. Докладчики представили результаты экспериментальных исследований состава и свойств грунтов, влияющих на развитие опасных процессов, что убедительно доказывает неразрывную связь разных направлений инженерной геологии (грунтоведения и инженерной геодинамики). Интересный доклад был представлен сотрудниками ООО “Геоинжсервис” (Москва) Н.Г. Волковым и И.С. Соколовым об интерпретации данных порового давления при диагностике оттаивающего грунтового основания. Следует отметить и доклад молодого исследователя ИГЭ РАН Г.С. Амановой в соавторстве с научным руководителем проф. Е.А. Вознесенским, которая представила моделирование пространственной неоднородности состава и свойств массива грунтов как инструмент оценки развивающихся в нем геологических процессов.

Приятно отметить, что много докладов молодых ученых было также представлено на секции “Природные и антропогенные процессы как фактор формирования инженерно-геологических условий территорий”, посвященной рассмотрению других инженерно-геодинамических процессов. Выполненные в соавторстве с научными руководителями и коллегами работы З.В. Селиной (ПГНИУ, Пермь) и Е.Р. Романовой (ИГЭ РАН, Москва) были посвящены исследованию карстовой и карстово-суффозионной опасности, а работа И.Г. Ковязина (УГГУ, Екатеринбург) – развитию оврагов в пределах городских территорий (на примере г. Ханты-Мансийск). Исключительно интересное и четко доложенное научное сообщение, с большим вниманием воспринятое аудиторией, представили студенты Санкт-Петербургского горного университета А.Г. Карпенко и Д.Л. Колосова. Их исследование, выполненное

под руководством проф. Р.Э. Дашко, было посвящено изучению влияния микроорганизмов на развитие инженерно-геологических процессов в подземном пространстве Санкт-Петербургского региона. Особенности геологического разреза Санкт-Петербурга, низкое положение дневной поверхности, повсеместное распространение болотных отложений, обогащенность дисперсных грунтов и подземных вод органическими соединениями абиотического и биотического генезиса определяют важную роль микроорганизмов в развитии опасных инженерно-геологических процессов, существенно осложняющих освоение подземного пространства города.

В докладах ведущих специалистов в области инженерной геодинамики А.В. Аникеева (ИГЭ РАН, Москва) и А.А. Лаврусевича и др. (МГСУ, Москва) на примерах конкретных ответственных инженерных объектов была дана оценка карстовой опасности и риска по различным авторским методикам. Кроме упомянутых выше опасных экзогенных процессов, обсуждение в рамках данной секции затронуло вопросы просадочности лесовых грунтов (Т.В. Андреева и др., МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва), озерного термокарста (Т.В. Орлов и др., ИГЭ РАН, Москва), подтопления и комплексных природно-техногенных опасностей на городских территориях (В.Г. Заиканов и др., ИГЭ РАН, Москва).

Обсуждение гидрогеоэкологических проблем при решении различных задач инженерной геодинамики было выделено на конференции в небольшую, но емкую по содержанию секцию. С их глубоким обзорным анализом выступила д.г.-м.н. И.В. Галицкая (ИГЭ РАН, Москва). В ее докладе (в соавторстве с к.г.-м.н. И.А. Костиковой) на конкретных примерах показано, что значительное изменение гидродинамических и гидрогеохимических условий на застраиваемых и застроенных территориях является одной из важных причин активизации опасных геологических и инженерно-геологических процессов: подтопления, оползнеобразования, карстообразования и др. Авторами продемонстрирована важная роль подземных вод в формировании и развитии техногенного литогенеза – одного из важнейших геологических (инженерно-геологических) процессов, обусловленных инженерно-хозяйственной деятельностью человека на градопромышленных территориях. Роль гидрогеохимических и гидродинамических условий в техногенной активизации карстовых процессов была подробно рассмотрена к.г.-м.н. О.Ю. Мещеряковой и к.г.-м.н. Н.Г. Максимовичем (ЕНИ ПГНИУ, Пермь) на ряде примеров из практики эксплуатации гидротехнических сооружений в разных регионах распространения эвапоритовых формаций. Ими убедительно показано, что инженерные ошибки, ведущие к негативным последствиям

для сооружений, к сожалению, повторяются на протяжении последнего столетия. Для безопасной эксплуатации сооружений в районах развития эвапоритов необходимы особые подходы, основанные на глубоком понимании сути карстовых процессов. Гидрогеоэкологические аспекты имеют первоочередное значение и при решении одной из важнейших задач современности – захоронении промышленных и коммунальных отходов. Это было убедительно продемонстрировано в докладе Р.Х. Мусина (КФУ, Казань), который вызвал многочисленные вопросы коллег и оживленную дискуссию. В его работе была проведена оценка эффективности планируемой реконструкции одного из крупных действующих полигонов захоронения промышленных отходов в Республике Татарстан, с учетом развития процесса самоочищения загрязненных подземных вод.

Заключительная секция XXIV “Сергеевских чтений” охватила широкий круг вопросов, связанных с методикой изучения и мониторинга природных и антропогенных процессов, включая применение дистанционных методов исследования в инженерной геодинамике. О применении дистанционных методов в рамках геологического мониторинга оползневого процесса на территории Уральского федерального округа рассказал научный сотрудник А.А. Худяков (УГТУ, Екатеринбург). Интересные предложения по организации геокриологического мониторинга автомобильных дорог в условиях криолитозоны выдвинул коллектив исследователей из ИГЭ РАН – к.г.-м.н. Д.О. Сергеев, А.П. Кулаков и др. О применении методов математической морфологии ландшафта для оценки изменений природных рисков для линейных сооружений в пределах эрозионно-термокарстовых равнин рассказала к.г.н. В.Н. Капралова (ИГЭ РАН, Москва). Большой интерес аудитории вызвали доклады Е.В. Дробининой (ПГНИУ, Пермь), которая поделилась результатами анализа цифровой модели рельефа при карстологическом прогнозе, а также Р.Ю. Жидкова (ГБУ “Мосгоргеотрест”, Москва), описавшем использование методов машинного обучения для оценки карстово-суффозионной опасности в Москве.

Работа конференции продолжалась два дня и завершилась выездной экскурсией – посещением памятника природы регионального значения – Собакинских ям, представляющих собой систему одиннадцати карстовых озер, вытянутых в цепочку вдоль р. Волга, и исторического города Свияжск.

По традиции к “Сергеевским чтениям” было приурочено торжественное вручение медали им. Е.М. Сергеева “За вклад в развитие инженерной геологии”. В 2023 г. лауреатами медали стали д.г.-м.н. А.В. Аникеев, д.г.-м.н. Е.Н. Самарин и д.г.-м.н. Д.С. Дроздов.

В XXIV “Сергеевских чтениях” приняли очное участие 126 человек, представлявшие 42 научные, учебные, производственные организации из 11 городов России (Москва, Казань, Пермь, Екатеринбург, Санкт-Петербург, Уфа, Дзержинск, Архангельск, Сочи, Пенза, Чебоксары), а также Казахстана. Более 20 человек участвовали дистанционно через онлайн подключение.

Все научные доклады, поступившие на конференцию и одобренные редколлегией (77 докладов), включены в электронный сборник трудов “Сергеевские чтения”, который будет проиндексирован в базе данных РИНЦ. Сборник разме-

щен на сайте конференции и доступен для скачивания по ссылке: <https://disk.yandex.ru/d/ct-Mm4Dvz4r1t3A>. Авторам лучших докладов предложено представить расширенную версию статьи для публикации в журнале “ГЕОЭКОЛОГИЯ. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология”.

На сайте конференции <https://sergeev2023-conf.ru/> размещен фотоотчет, который также доступен для скачивания.

О.Н. Еремина