

ISSN 0869-7809

Номер 4

Июль - Август 2023



ГЕОЭКОЛОГИЯ

*Инженерная геология
Гидрогеология
Геокриология*

www.sciencejournals.ru



СОДЕРЖАНИЕ

Номер 4, 2023

ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ ПРИРОДНЫХ И ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Возможные последствия сценарных землетрясений в Кавминводской зоне

*Н. И. Фролова, И. П. Габсатарова, В. И. Ларионов, С. П. Суцев,
Н. С. Малаева, Г. Ю. Донцова*

3

Водопонижение как ведущий фактор развития суффозии при строительстве фундаментов глубокого заложения

П. И. Кашперюк, Д. С. Москалев, В. П. Хоменко

18

Деформации зданий на засоленных мерзлых грунтах в поселке Амдерма вследствие климатических изменений

Ю. В. Черняк, С. В. Бадина, А. В. Брушков

29

ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

Отличительные особенности карчеходов на селевых водотоках о. Сахалин

С. В. Рыбальченко

40

Развитие экзогенных геологических процессов и явлений на автомобильной дороге “Удокан–Наминга” (Северное Забайкалье)

А. П. Кулаков, Д. О. Сергеев

53

ГРУНТОВЕДЕНИЕ И МЕХАНИКА ГРУНТОВ

Параметры динамической прочности глинистых грунтов и методика их определения

Е. А. Сенцова, М. С. Никитин, Е. А. Вознесенский

63

ЗАГРЯЗНЕНИЕ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

Влияние углеводородного загрязнения на экологическое состояние песчаных почв территории месторождения Дзунбаян (Восточная Монголия)

Л. А. Гаретова, Г. В. Харитонова, Е. Л. Имранова

74

Фоновые геоэкологические условия на территории Эльконского урановорудного района

М. О. Миронова

86

Contents

Number 4, 2023

FUNCTIONING OF NATURAL AND NATURAL ANTHROPOGENIC SYSTEMS

A possible impact of scenario earthquakes in the Caucasian Mineral
Waters Zone

*N. I. Frolova, I. P. Gabsatarova, V. I. Larionov, S. P. Suchshev,
N. S. Malaeva, and G. Yu. Dontsova*

3

Dewatering as a leading factor in the development of suffusion upon the construction
of deep foundations

P. I. Kashperiyuk, D. S. Moskalev, and V. P. Khomenko

18

Deformations of buildings on frozen saline soils due to climate change
(the case of Amderma village, Russia)

Yu. V. Chernyak, S. V. Badina, and A. V. Brushkov

29

NATURAL AND TECHNONATURAL PROCESSES

Drifting timber formation on mudflow rivers on Sakhalin Island

S. V. Rybalchenko

40

Development of exogenous geological processes and phenomena on the Udokan–Naminga
highway (the Northern Ttansbaikalia)

A. P. Kulakov, D. O. Sergeev

53

SOIL AND ROCK ENGINEERING AND MECHANICS

Dynamic strength parameters of clay soils and methods for their determination

E. A. Sentsova, M. S. Nikitin, and E. A. Voznesensky

63

ENVIRONMENT CONTAMINATION

Hydrocarbon contamination impact on sandy soils within the Dzunbayan oil field
(Eastern Mongolia)

L. A. Garetova, G. V. Kharitonova, and E. L. Imranova

74

Background geocological conditions of Elkon gold-uranium ore region

M. O. Mironova

86

ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ ПРИРОДНЫХ И ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 624.131.1:551.252

ВОЗМОЖНЫЕ ПОСЛЕДСТВИЯ СЦЕНАРНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В КАВМИНВОДСКОЙ ЗОНЕ

© 2023 г. Н. И. Фролова^{1,*}, И. П. Габсатарова^{2,**}, В. И. Ларионов^{1,3}, С. П. Суцев^{3,***},
Н. С. Малаева¹, Г. Ю. Донцова²

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

²Федеральный исследовательский центр “Единая Геофизическая Служба РАН” (ФИЦ ЕГС РАН),
Ленина пр., 189, Обнинск, 249035 Россия

³Московский государственный технический университет им. Баумана (МГТУ),
2-я Бауманская ул., 5, Москва, 105005 Россия

*E-mail: frolovanina7@gmail.com

**E-mail: ira@gstras.ru

***E-mail: Sersan150@mail.ru

Поступила в редакцию 24.04.2023 г.

После доработки 05.05.2023 г.

Принята к публикации 25.05.2023 г.

В статье анализируются возможные последствия сценарных землетрясений в зонах повышенной сейсмической опасности с целью обоснования мероприятий по обеспечению безопасности населения. В качестве примера рассматривается юг Ставропольского края. За последнее двадцатилетие территория Центрального Предкавказья характеризуется активизацией сейсмической активности по данным сети ФИЦ ЕГС РАН на Северном Кавказе по регистрации сейсмических событий широкого спектра магнитуд с $M \geq 1$. Одно из последних ощутимых событий $m_b = 4.4$ произошло в рассматриваемом районе 1.04.2023 г. и проявилось интенсивностью от 3 до 4 баллов по шкале MSK-64 в крупных курортных городах Ставропольского края. Для выбора параметров сценарных событий используются результаты работ Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН (ИФЗ РАН), полученные в ходе работ по детальному сейсмическому районированию (ДСР) и общему сейсмическому районированию (ОСР-2016). Для расчета последствий в курортных населенных пунктах, расположенных в южной части Ставропольского края, применена система “Экстремум”. Анализируется влияние особенностей распространения сейсмического эффекта и параметров уравнения макросейсмического поля на результаты моделирования последствий сценарийных землетрясений. Особое внимание уделяется исследованию глубин сильных и умеренных событий в рассматриваемом районе Северного Кавказа и ориентации изосейст макросейсмического поля. Рекомендуется выполнение предварительной калибровки моделей системы “Экстремум” для оценки потерь от землетрясений. Приводятся результаты моделирования возможного ущерба при сценарных землетрясениях с $M = 6.0$ и $M = 5.5$ для отдельных крупных городов Кавминводской зоны. Результаты исследований могут быть использованы при разработке как планов превентивных мероприятий, так планов реагирования в случае возможных событий в регионе.

Ключевые слова: система “Экстремум”, зоны ВОЗ, последствия землетрясения, сценарное событие, Ставропольский край, Кавминводская зона

DOI: 10.31857/S0869780923040033, EDN: WXXBWW

ВВЕДЕНИЕ

Защита населения от природных катастроф и, в первую очередь, от землетрясений, которые чаще всего приводят к гибели людей и значительным экономическим потерям, — одна из актуальных задач современной науки.

Согласно статистическим данным Центра эпидемиологии катастроф (<http://www.emdat.be>), в 2022 г. произошло 387 природных катастроф,

что немного больше среднего числа событий за период 2002–2021 гг. (370 событий). Число погибших в 2022 г. составило 30 704 человека, что в 3 раза больше, чем в 2021 г., но ниже среднего показателя за 2002–2021 гг. — 60955 человек. Среднее количество землетрясений в 2022 г. (31 событие) было чуть больше среднего за период 2002–2021 гг. Количество погибших от землетрясений в 2022 г. составило 1626 человек, что более чем

в 2 раза меньше средних показателей за 2002–2021 гг. (35124 погибших). В 2022 г. стоит отметить три землетрясения, два из которых вошли в десятку самых смертоносных стихийных бедствий мира в этом году: землетрясения на юго-востоке Афганистана в июне (1036 погибших) и в Индонезии в ноябре (334 погибших). Землетрясение в Японии на Фукусиме в 2022 г. не привело к значительным социальным потерям, но экономический ущерб от этого события составил 8.8 млрд долларов США.

Тенденцию уменьшения числа погибших от землетрясений в 2022 г. нельзя считать выполнением задач, сформулированных в Сендайской рамочной программе ООН по снижению риска бедствий. В настоящее время по-прежнему существует очевидная необходимость в совершенствовании эффективности политики управления рисками и возможными последствиями от ожидаемых событий в будущем. Катастрофические последствия землетрясения 6.02.2023 г. в Турции связаны как с быстрым ростом населения в городских местностях, так и недостатком финансирования мероприятий по усилению существующей застройки на случай сильного землетрясения. Это событие, унесшее жизни более 80000 жителей Турции и Сирии, стало подтверждением необходимости повышения осознания сейсмической опасности и проведения адекватных превентивных мероприятий по сейсмостойкому усилению зданий в сейсмоопасных районах.

В разных районах России в соответствии с данными среднесрочного прогноза землетрясений возможны сильные землетрясения, которые, как правило, приурочены к зонам ВОЗ. Территория Северного Кавказа и, в том числе Ставропольского края (СК), не является исключением. Около 14% территории СК характеризуются значениями индивидуального сейсмического риска [24], требующими уточнения возможных негативных последствий будущих землетрясений на территории края.

Цель настоящего исследования – оценка последствий сценарных событий для наиболее опасных зон ВОЗ на территории СК.

Актуальность такого исследования подчеркивается произошедшим 1.04.2023 г. в исследуемом районе ощутимого до 4 баллов землетрясения, вызвавшего волнения среди населения Кавказских Минеральных Вод и широкий резонанс в средствах массовой информации.

Методически настоящее исследование связано с изучением влияния параметров уравнения макросейсмического поля и глубины очага на результаты компьютерного моделирования последствий от сценарных землетрясений с использованием системы “Экстремум”, разработанной с

участием авторов данной статьи. Применяемая методика детально описана в работах [8–10].

Параметры событий выбраны согласно результатам работ ИФЗ РАН, полученных в рамках работ по детальному сейсмическому районированию (ДСР) территории Ставропольского края [1, 11, 19, 21, 22] и общему сейсмическому районированию (ОСР-2016) [16].

ТЕКТОНИЧЕСКАЯ ОБСТАНОВКА И СИЛЬНЫЕ И ОЩУТИМЫЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ НА ТЕРРИТОРИИ СТАВРОПОЛЬСКОГО КРАЯ

В тектоническом отношении рассматриваемый район расположен в пределах эпигерцинской Скифской плиты (молодой платформы) с интенсивно дислоцированным герцинским складчатым основанием и мезо-кайнозойским чехлом. На территории Центрального Предкавказья выделяются четыре крупные неотектонические структуры: Восточно-Кубанский прогиб, Ставропольский свод, Минераловодский выступ и Терско-Каспийский прогиб [20, 22].

Наиболее сейсмоактивен район Кавказских Минеральных Вод [14, 15], где по оценкам сейсмического потенциала Кавказа по межрегиональному методу [18] с учетом палеосейсмологических и сеймотектонических данных был выделен Кисловодский потенциальный очаг с $M_{\max} = 6.5–7.8$. В этом очаге в XX в. наиболее сильными, 8- и 7-балльными землетрясениями считают: Усть-Джегутинское, Пятигорское, Кисловодское и Кавминводское (табл. 1).

29.06.1921 г. в районе Кавказских Минеральных вод (КМВ) произошло наиболее сильное землетрясение за последние два столетия с магнитудой $M = 5.6$. В [2] сообщалось: “В Кисловодске – (7 баллов), ощущалось довольно сильное землетрясение с гулом. Отмечено три толчка; первый – наиболее сильный. Падала посуда, двигалась мебель, оконные и дверные переплеты повреждены, отвалилась штукатурка, образовались трещины в домах, в некоторых случаях наблюдалось выпадение простенков в домах. Резко изменился дебит всех минеральных источников. В Железноводске и Пятигорске (6–7 баллов) – довольно сильные толчки; осыпание штукатурки и трещины в стенах”.

В результате Кавминводского землетрясения 28.02.1978 г. (см. табл. 1) изменился режим минеральных источников и буровых скважин, отмечались световые явления. Очаг этого землетрясения расположен в зоне пересечения глубинных разломов общекавказского простирания – Невинномысского и Черкесского, с поперечным Эльбрусским. Проявления этого землетрясения были изучены Э.А. Казиным, который в период 1965–1991 гг. был заведующим сейсмической станцией

Таблица 1. Сведения о наиболее сильных и ощутимых землетрясениях в Ставропольском крае, рассмотренных в настоящем исследовании

№ пп.	Дата	Координаты		M	Глубина, км	I_0 , балл	Название землетрясения
		φ° , N	λ° , E				
1	18.04.1909 г.	—	—	4.6			Усть-Джегутинское
2	04.07.1912 г.	—	—	4.7 ± 0.5		$6-7 \pm 0.5$	Пятигорское
3	29.06.1921 г.	43.9	42.8	5.6 ± 0.3	22 (15–33)	7 ± 0.5	Кисловодское
4	02.10.1971 г.	44.8	42.1	4.5 ± 0.3	2.5 (1–4)	8 ± 0.5	Ставропольское
5	28.02.1978 г.	44.11	42.77	4.5	15 (по инстр. данным), 12 и 5 км – по макросейсмическим данным	$7-8 \pm 0.5$	Кавминводское
6	19.10.1999 г.	44.70	42.68	3.7	13	6–7	Верхне-Янкульское
7	22.06.2006 г.	44.04	42.7	4.1	10	—	Суворовское
8	02.05.2012 г.	44.8	41.66	4.0	7	5	Заветненское
9	15.12.2012 г.	44.4	42.46	3.8	14	4	Воровсколесское

“Пятигорск” и проводил большую работу по сбору макросейсмической информации об ощутимых землетрясениях центральной части Северного Кавказа. Сильнее всего землетрясение ощущалось в совхозе “Кисловодский” – 7–8 баллов (сквозные трещины в наружных стенах, трещины в фундаменте), в ст. Боргустанская – 7 баллов, в ст. Суворовская – 6–7 баллов (в кирпичных домах многочисленные трещины), в Невинномысске – 4–5 балла [7, 17].

В области КМВ в 1999, 2006 и 2012 г. произошли ощутимые события умеренной силы, которые проявились интенсивностью 4–5 и 6–7 баллов по шкале MSK-64.

19.10.1999 г. в центральной части Ставропольской возвышенности на территории Северного Кавказа произошло ощутимое Верхне-Янкульское землетрясение. Параметры уточненного очага: $\varphi = 44.73^\circ\text{N}$, $\lambda = 42.65^\circ\text{E}$, $h = 7$ км, $M_S = 4.4$. Максимальная интенсивность сотрясений (6–7 баллов) отмечена в с. Верхний Янкуль. Перед землетрясением и во время него был слышен сильный гул. Землетрясение началось резким толчком снизу, через 2–3 с последовали сильные горизонтальные колебания в направлении с запада на восток. В результате землетрясения на всех домах произошло полное обрушение труб. Слетала черепица с крыш, рамы выпадали из стен, в некоторых домах образовались сквозные трещины в стенах, раскалывалась и частично обваливалась штукатурка. Основной толчок ощущался на большей части СК. В Ставрополе (расстояние от эпицентра 47 км) землетрясение ощущалось силой 3–4 балла [23].

22.06.2006 г. на юге СК произошло ощутимое Суворовское землетрясение с расчетной магнитудой 4.1 (см. табл. 1). Проявления с интенсивно-

стью сотрясений 5 баллов известны только в станице Суворовская, удаленной на 4 км от макросейсмического эпицентра. Очаг землетрясения находился в 10 км к северо-западу от эпицентра Кавминводского землетрясения [4].

02.05.2012 г. и 15.12.2012 г. в Эльбрусско-Минераловодской области Северного Кавказа произошли два землетрясения (см. табл. 1): Заветненское с эпицентром вблизи с. Заветное и Воровсколесское вблизи станицы Воровсколесская. Оба они ощущались в населенных пунктах от 2 до 4 баллов. Эпицентр Заветненского землетрясения находился в пределах диагональной Армавино-Ессентукской разломной зоны. Оно ощущалось на территории СК, а также восточной части Краснодарского края и северной части Карачаево-Черкесской Республики. Наиболее сильно землетрясение ощущалось в селах Заветное и Балахновское – 4 балла. Многие жители слышали гул, громкий треск, похожий на взрыв, ощутили два толчка (первый резкий, второй колебательный), сотрясение домов продолжительностью ~7–15 с. В Ставрополе (в 35 км от очага) землетрясение ощущалось силой 3 балла. Некоторые люди слышали гул, как при движении тяжело нагруженной машины, хлопок, ощущали слабые толчки. Воровсколесское-II землетрясение ощущалось с интенсивностью 4 балла, как на территории СК, так и на территории Карачаево-Черкессии [5].

По данным сети ФИЦ ЕГС РАН, на Северном Кавказе по регистрации сейсмических событий широкого спектра магнитуд с $M \geq 1$ территория СК является частью умеренно сейсмоактивного Центрального Предкавказья, которая за последнее двадцатилетие характеризуется современной активизацией сейсмической активности.

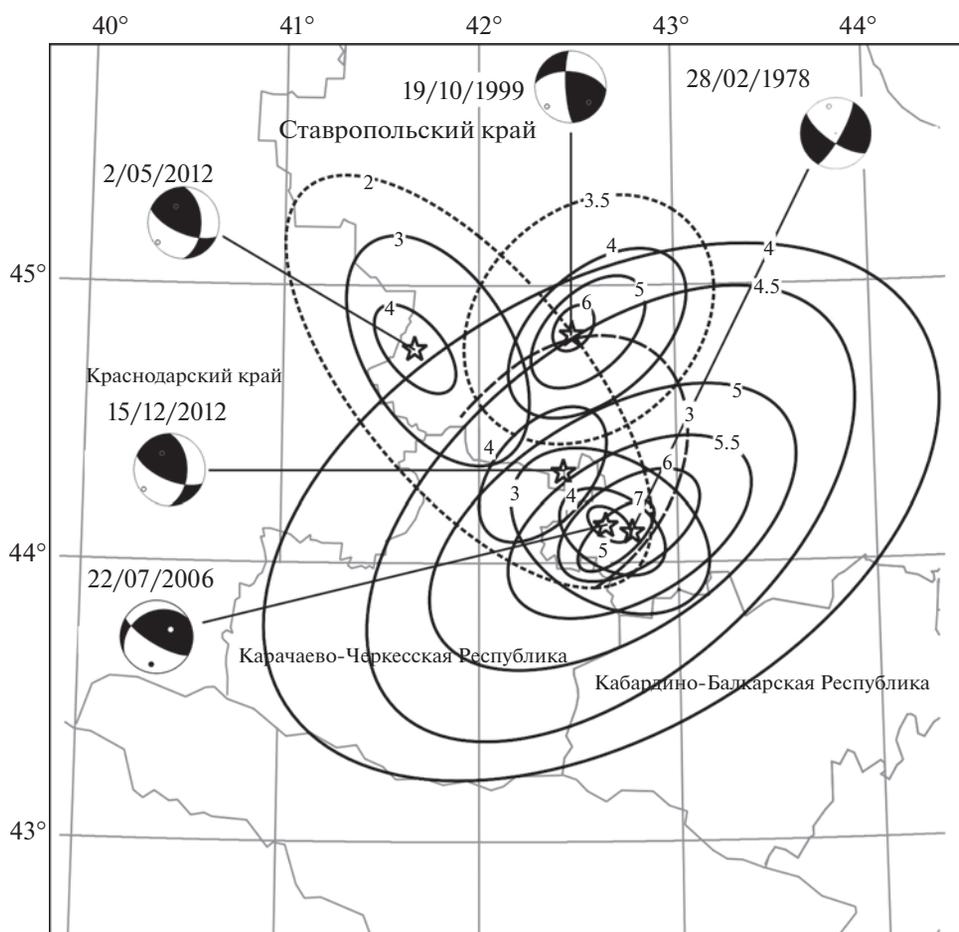


Рис. 1. Сводная карта изосейст землетрясений в СК.

Рассмотрены разные варианты развития событий в регионе с учетом существующих пространственно-временных моделей фаз подготовки сильного землетрясения и аналогичных прецедентов в других регионах и на Кавказе. Для более опасного варианта, который представляется вполне вероятным, по характеристикам области активизации и затишья внутри нее и с учетом динамики, сделаны оценки позиции возможного очага, его магнитуды и интервала возможного времени возникновения. По этим данным ситуация признается тревожной и требующей пристального слежения.

По мнению А.А. Никонова [14], вариантов развития сейсмического процесса в исследуемом районе может быть два. Один — это вспарывание разрыва СЗ простирания, при котором очаг может располагаться на глубине 6–15 км. Другой, более опасный и не менее возможный вариант, но, вероятно, несколько более отдаленный по времени, — возникновение более заглубленного (20–30 км) землетрясения в зоне разлома СВ простирания.

На рис. 1 приведены изосейсты наиболее сильных ощутимых землетрясений на юге СК 19.10.1999 ($M_s = 3.7$ и $I_0 = 6-7$ баллов), 22.07.2006 ($M_s = 4.1$ и $I_0 = 5$ баллов), 2.05.2012 ($M = 4.0$ и $I_0 = 5$ баллов) и 15.12.2012 ($M = 3.8$ и $I_0 = 4$ балла); а также изосейсты сильнейшего Кавминводского (28.02.1978) с $M = 4.5$ и $I_0 = 7-8$ баллов. Построено единое макросейсмическое поле, которое показывает, что выделяются два квазиперпендикулярных направления, по которым вытянуты эллипсы изосейст: СЗ направления — вдоль Армави́ро-Невинномысского глубинного разлома, и СВ направления, согласующегося с Транскавказским поперечным поднятием.

Полученные по знакам первого движения в P -волне типы механизмов очагов названных сильных землетрясений хорошо согласуются с макросейсмическими полями и кинематикой разломных зон по схеме Е.Е. Милановского [13]: очаги землетрясений в пределах СЗ направления — взбросо-сдвиги, имеющие общее простирание с одной из нодальных плоскостей вдоль Армави́ро-Ессентукского разлома, в отличие от

Таблица 2. Параметры возможных наиболее опасных сценарных событий в соответствии с экспертной оценкой Е.А. Рогожина и для доменов по карте ОСР-2016

Номер события, по рис. 2	Координаты эпицентра		Глубина очага, км	M_{\max}	Глубина очага, км	M_{\max}
	φ°, N	λ°, E				
				по данным Е.А. Рогожина	по доменам ОСР-2016	
№ 1	43.75	43.08	20	7	3–13.5	5.5
№ 2	43.92	42.49	15	6	3–13.5	5.5
№ 3	43.98	43.22	15	6	3–13.5	5.5
№ 4	43.71	42.44	20	7	3–13.5	5.5
№ 5	44.98	41.97	10	5	3–13.5	5.5

Кавминводского землетрясения – сбросо-сдвиг с очагом в Эльбрусско-Минераловодской зоне сбросо-сдвиговых нарушений.

Установленный характер вытянутости эпицентральных зон рассмотренных землетрясений соотносится с зонами разломов, соответственно, СЗ и СВ простирания, которые в этих условиях естественно считать сейсмогенерирующими и потенциально опасными. Далее в расчетах последствий сценарных землетрясений в Кавминводской зоне это будет учтено, будут использованы направления в $\zeta = 40^\circ$ и $\zeta = 320^\circ$.

Совсем недавнее оживление сейсмической активности в рассматриваемом районе произошло 1.04.2023 г., когда в 14 час 03 мин было зарегистрировано землетрясение с $m_b = 4.4$, ощущавшееся до 4 баллов жителями из населенных пунктов:

пос. Иноземцево, городов Пятигорск, Железноводск, Георгиевск, Минеральные Воды, Ессентуки, Кисловодск, Новопавловск Советского округа, станиц Ессентукская Предгорного округа и Лысогорская Георгиевского округа, с. Краснокумское Георгиевского округа. Координаты гипоцентра: $N = 44.043^\circ$, $\lambda^\circ E = 43.295^\circ$, $h = 10$ км довольно близки к сценарному событию № 3, которое будет описано в следующем разделе (табл. 2, рис. 2).

СЕЙСМИЧЕСКАЯ ОПАСНОСТЬ ТЕРРИТОРИИ СТАВРОПОЛЬСКОГО КРАЯ И ПАРАМЕТРЫ СЦЕНАРНЫХ СОБЫТИЙ

Последние годы в результате детальных исследований по оценке сейсмической опасности Се-

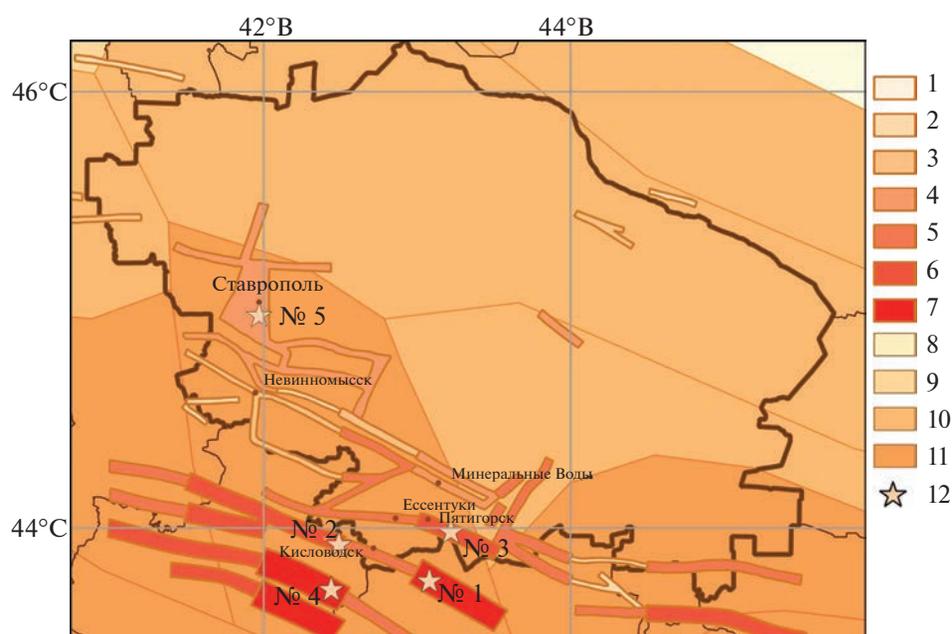


Рис. 2. Зоны ВОЗ для территории СК по ОСР-2016 [16] и ДСР [21]: 1–7 – M_{\max} для зон ВОЗ по ДСР: 1–4.0, 2–4.5, 3–5.0, 4–5.5, 5–6.0, 6–7.0; 6–11 – M_{\max} для доменов ОСР-2016: 7–3.5, 8–4.0, 9–4.5, 10–5.0, 11–5.5; 12 – эпицентры сценарных землетрясений.

Таблица 3. Параметры сценарных событий для расчета последствий землетрясений в Кавминводской зоне

№	Параметры сценарного события	k	ζ
2а	43.92° N; 42.49° E; $M = 6$; $h = 15$ км	$k = 2$	40°
2б	—“—	—“—	320°
2в	43.92° N; 42.49° E; $M = 5.5$; $h = 3$ км	—“—	40°
2г	43.92° N; 42.49° E; $M = 5.5$; $h = 13.5$ км	—“—	—“—
3а	43.98° N; 43.22° E; $M = 6$; $h = 15$ км	—“—	—“—
3б	—“—	—“—	320°
3в	43.98° N; 43.22° E; $M = 5.5$; $h = 3$ км	—“—	40°
3г	43.98° N; 43.22° E; $M = 5.5$; $h = 13.5$ км	—“—	—“—

Таблица 4. Средние степени повреждения d_{cp} в отдельных городах КМВ зоны при сценарных событиях 2а, 2б, 3а и 3б

Название населенного пункта	Событие		Δ , км	Δd_{cp} , %	Событие		Δ , км	Δd_{cp} , %
	2а	2б			3а	3б		
Пятигорск	2.1	1.6	48	23	3.2	3.6	14	14
Кисловодск	3.1	3.1	18	0	2.2	1.9	40	12
Ессентуки	2.8	2.1	32	24	2.4	2.7	30	14
Минеральные Воды	2.0	1.2	60	41	2.7	3.1	26	14
Георгиевск	1.3	0.9	81	34	3.2	2.4	27	25

верного Кавказа и, в частности западной части СК [1, 11, 16, 19, 21, 22], были разработаны карты зон ВОЗ рассматриваемого региона.

По детальным оценкам [22], некоторая часть территории СК относится к зонам ВОЗ ($M_{max} = 6-7$), центральная ее часть – к ($M_{max} = 5.0-5.5$), а с юга и востока территории соседствуют зоны с $M_{max} = 7$. На рис. 2 совместно представлены вариант карты зон ВОЗ, подготовленный коллективом ИФЗ РАН под руководством Е.А. Рогожина, и карта доменов согласно актуализированной линейно-доменно-фокальной модели (ЛДФ модели) зон ВОЗ для СК, подготовленная в рамках работ по созданию комплекта карт ОСР-2016 [16]. На карте также показаны эпицентры возможных сценарных событий для наиболее опасных зон ВОЗ в соответствии с экспертным заключением Е.А. Рогожина, их параметры приведены в табл. 2.

Для исследования влияния коэффициентов макросейсмического поля и глубины очага и расчета последствий сценарных событий были выбраны второй и третий очаги (см. табл. 2, рис. 2) как наиболее вероятные, по мнению авторов, события и их характеристики. Расчеты последствий были выполнены для $M = 6$ в соответствии с оценками Е.А. Рогожина и для $M = 5.5$ в соответствии с оценками для доменов по карте ОСР-2016 (табл. 3).

Расчеты последствий сценарных событий были выполнены с применением методов имитаци-

онного компьютерного моделирования с использованием системы “Экстремум”, разработанной с участием авторов данной статьи [7–9].

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ ПОСЛЕДСТВИЙ СЦЕНАРНЫХ СОБЫТИЙ

На рис. 3 показаны результаты расчета последствий сценарных землетрясений 3а и 3б (см. табл. 3, рис. 2), очаг которого расположен ближе всего к г. Пятигорск. Расчет выполнен с использованием уравнения затухания интенсивности (1), полученного ранее авторами в результате калибровки модели макросейсмического поля для юга СК [24] для величины сжатия эллипса затухания интенсивности, характеризуемой отношением большой и малой осей эллиптических изосейст высших баллов $k = 2$, и ориентации макросейсмического поля под углами $\zeta = 40^\circ$ и $\zeta = 320^\circ$.

$$I = 1.6M - 2.12 \pm 0.17 \log(r) + 1.28 \pm 0.48. \quad (1)$$

На картах значками разного размера показаны города с разной численностью населения, цвет значка – средняя степень повреждения застройки города.

В табл. 4 приведены расчетные значения средних степеней повреждения застройки для сценарных событий 2а, 2б, 3а, 3б (см. табл. 3).

Сравнение расчетных средних степеней повреждения d_{cp} застройки крупных населенных

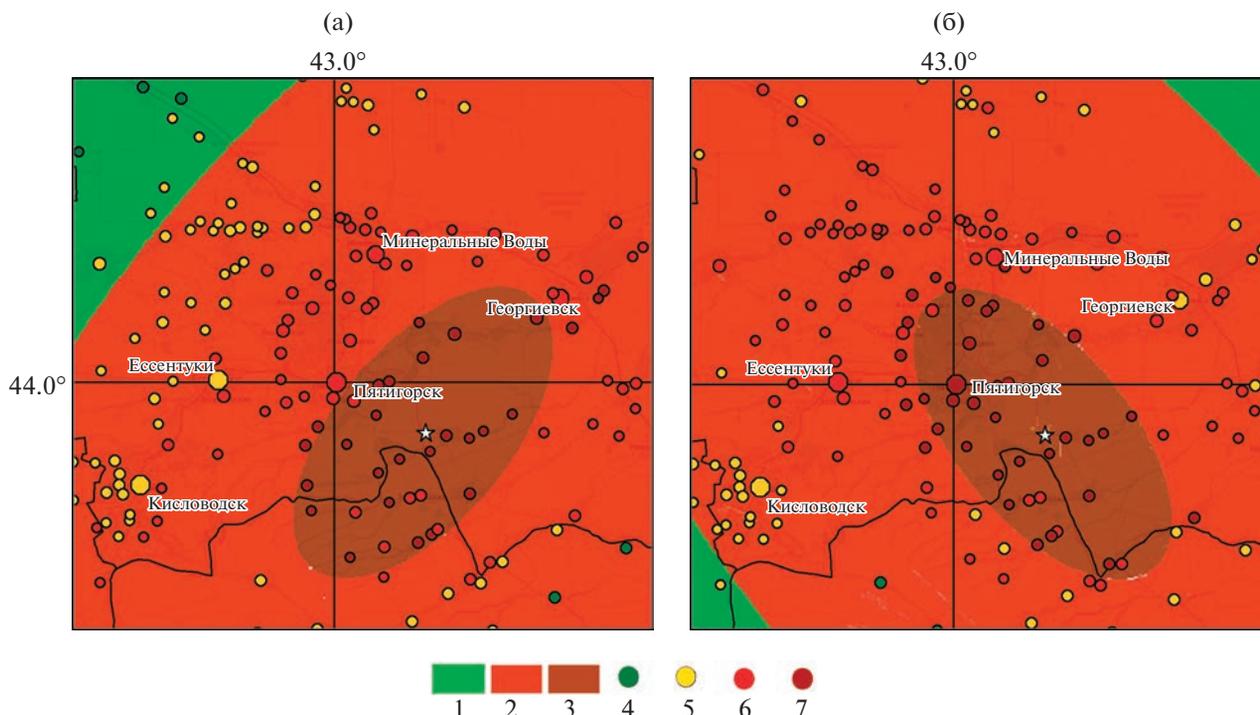


Рис. 3. Возможные последствия сценарных событий (см. рис. 2; табл. 3): а – 3а; б – 3б. 1–3 – интенсивность (I) в баллах MSK-64: 1–6–7, 2–7–8, 3–8–9; 4–7 – средние степени повреждения в населенных пунктах: 4 – легкие и умеренные ($d1$ и $d2$), 5 – тяжелые ($d3$), 6 – частичные разрушения ($d4$), 7 – обвалы ($d5$); звезды – эпицентры событий 3а и 3б.

пунктов при разных ориентациях макросейсмического поля под углами 40° и 320° показывает, что при эпицентральной дистанции $\Delta < 30$ км влияние ориентации незначительно (12–25%). Однако с увеличением эпицентральной дистанции при $\Delta > 60$ км эта разница может составить 41%.

Учитывая близость очагов сценарных событий к населенным пунктам, высокую плотность населения в Кавминводской агломерации СК (~ 50 чел./ m^2), а также индекс наклона ЛДФ-модели зоны ВОЗ, равный 90° , расчеты последствий сценарных событий 2в, 2г, 3в, 3г (см. табл. 3) были выполнены для одной ориентации эллипса макросейсмического поля – $\zeta = 40^\circ$.

Влияние глубины очага h сценарных событий на эффект от землетрясений в рассматриваемом районе Северного Кавказа изучено на примере сценарных событий 2в и 2г, 3в и 3г. На рис. 4 показаны результаты моделирования последствий событий 3в и 3г.

При моделировании последствий события 3в на рис. 4а появляются изосейсты 7 и 8 баллов. Возможный эффект проявления $I = 8$ баллов приурочен к эпицентральной зоне, что свидетельствует о влиянии глубины очага h в ближней зоне. Влияние глубины очага h сценарного события на средние степени повреждения застройки d_{cp} проявляется на расстояниях до $\Delta \leq 30$ км. На рас-

стояниях $\Delta \geq 40$ км оно незначительно, а на расстояниях $\Delta \geq 60$ км средние расчетные степени повреждений застройки совпадают (рис. 5).

На рис. 6 показаны результаты расчета d_{cp} для отдельных курортных городов СК в случае сценарных событий 2а, 2в, 2г, 3а, 3в, 3г (см. табл. 3, рис. 2).

В случае сценарного события 2а с магнитудой $M = 6$ наивысшие средние степени повреждения застройки $d_{cp} = 3$ получены для г. Kislovodsk (см. рис. 6а).

Для сценарного события 3а, наибольшие значения средних степеней повреждения $d_{cp} > 3$ получены для Пятигорска и Георгиевска (см. рис. 6б). Эпицентр этого события расположен ближе к городам Кавминводской агломерации, поэтому оценки d_{cp} для этих населенных пунктов выше, чем в случае сценарного события 2а.

В целом для сценарных событий 2а и 3а получены более высокие значения средних степеней повреждения зданий d_{cp} в курортных городах Кавминводской зоны (см. рис. 6) по сравнению с событиями 2в, г и 3в, г (табл. 3, рис. 2) с $M = 5.5$.

При оценках средних степеней повреждения d_{cp} застройки в населенном пункте нужно также учитывать вероятность получения зданиями разных степеней повреждения. Для событий 2а и 3а

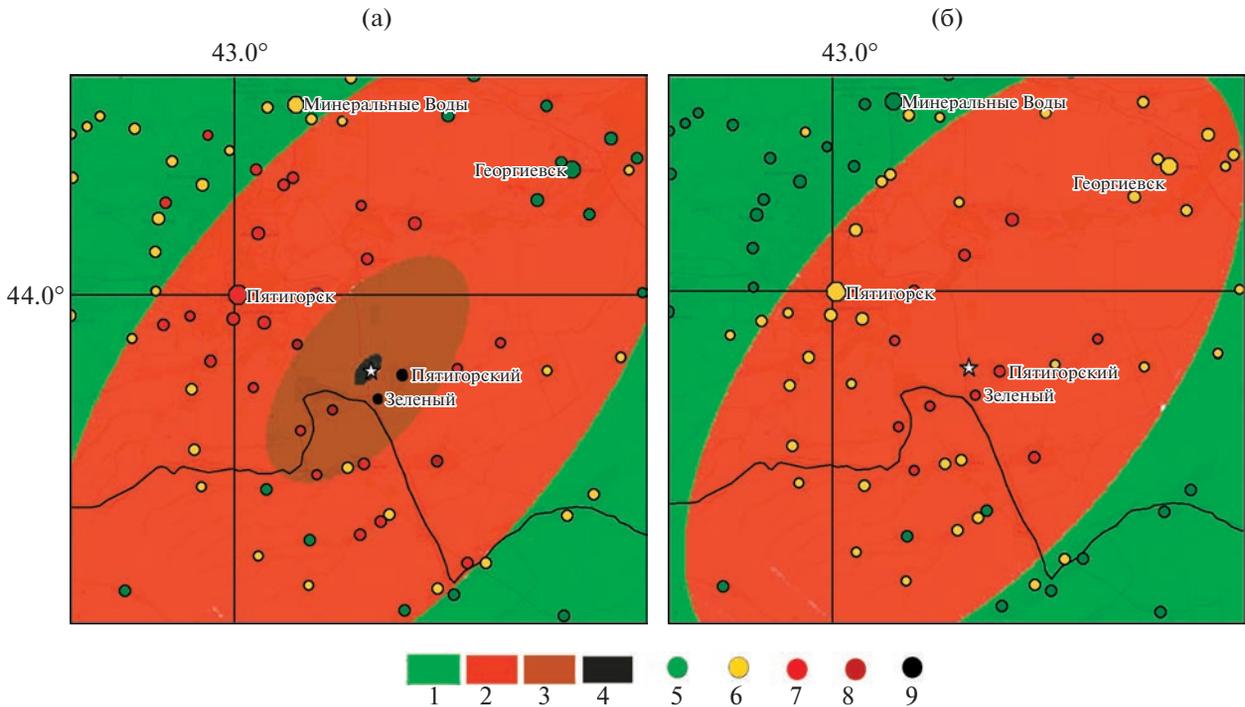


Рис. 4. Возможные последствия сценарных событий (см. рис. 2, табл. 3): а – 3в; б – 3г. 1–4 – интенсивность (I) в баллах MSK-64: 1–6–7, 2–7–8, 3–8–9, 4–9–10; 5–7 – средние степени повреждения в населенных пунктах: 5 – легкие ($d1$), 6 – умеренные ($d2$), 7 – тяжелые ($d3$), 8 – частичные разрушения ($d4$), 9 – обвалы ($d5$); звезды – эпицентры событий 3в и 3г.

такие расчетные вероятности или процент зданий, которые могут получить разные степени повреждения в отдельных курортных городах, приведены в табл. 5.

Несмотря на тот факт, что расчетная средняя степень повреждения зданий в городах курортной

зоны не превышает $d_{cp} = 3.2$ (см. табл. 5), отдельные здания могут получить более высокие степени $d4$ (частичное разрушение) и даже $d5$ (обвалы). При реализации события 3а в Пятигорске и Георгиевске до 20% зданий могут получить степень повреждения $d5$. При реализации события 2а в Кисловодске при расчетной средней степени повреждения $d_{cp} = 3.1$ более 40% зданий могут получить степени повреждений $d4$ и $d5$.

РАСЧЕТ УЩЕРБА ДЛЯ ЗДАНИЙ РАЗНОГО ТИПА

На рис. 7 показано расчетное распределение повреждений зданий разного типа по шкале MMSK-86 [25] в Пятигорске, Ессентуках и Кисловодске при реализации сценарного события 3а.

Наиболее сильным повреждениям вплоть до полного обрушения ($d5$) подвергнутся здания типа А. В Пятигорске доля таких зданий может составить 44% (рис. 7а), в Ессентуках – 12% (рис. 7б), в Кисловодске – 10% (рис. 7в). Процент повреждения зданий типа Б значительно ниже. Степень повреждения $d5$ могут получить от 1% зданий в Кисловодске (рис. 7в) и до 12% в Пятигорске (рис. 7а).

Для получения более надежных оценок последствий сценарных землетрясений на город-

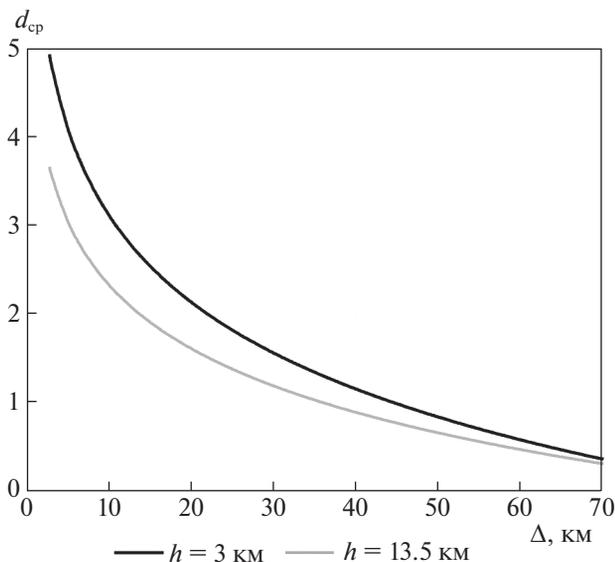


Рис. 5. Влияние глубины очага сценарного события на средние степени повреждения застройки d_{cp} .

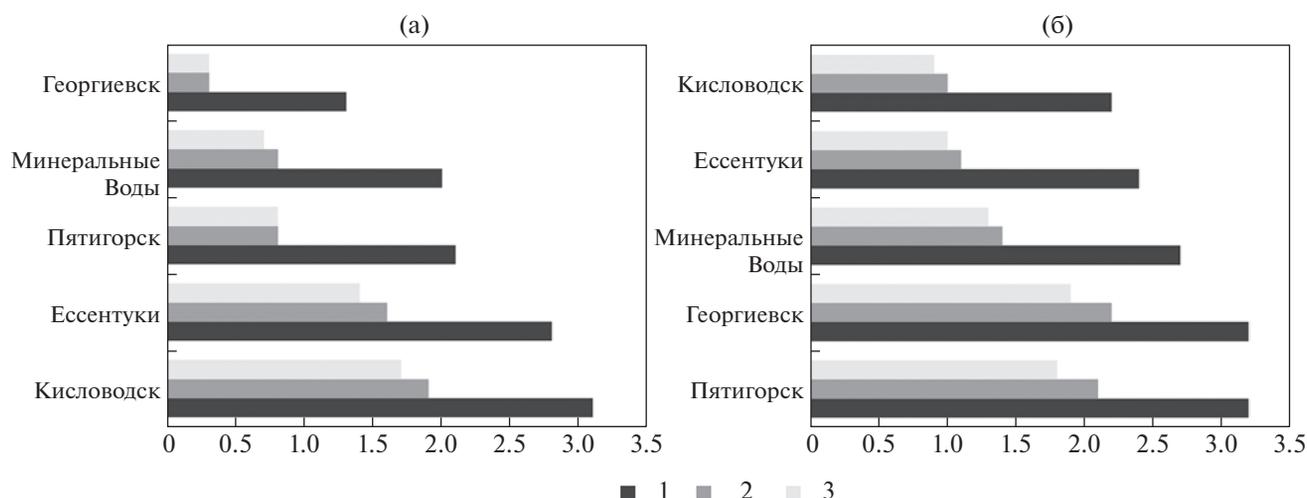


Рис. 6. Средние степени повреждения застройки d_{cp} : а – сценарные события 2а, 2в, 2г; б – сценарные события 3а, 3в, 3г. События: 1 – 2а и 3а, 2 – 2в и 3в, 3 – 2г и 3г. Населенные пункты расположены снизу вверх в зависимости от удаления от эпицентра.

ском уровне в настоящем исследовании выполнена актуализация распределения зданий разного типа по шкале MMSK-86 [25] для г. Ессентуки. Была проанализирована информация с сайта “Реформа ЖКХ” (<https://www.reformagkh.ru>) о материале несущих стен и перекрытий в многоквартирных домах, количестве этажей, квартир и подъездов в доме и численности жителей.

Дополнительно совместно обрабатывались космические снимки и “фото панорамы” сервиса компании Яндекс.

Уточненная информация о поквартальной застройке г. Ессентуки, включающая поквартальный процент зданий разного типа по шкале MMSK-86 и их средние высоты, была использована для расчета последствий сценарных событий 2а и 2в (табл. 3, рис. 2). На рис. 8 показаны резуль-

таты расчета средних степеней повреждений d_{cp} для кварталов города.

По наиболее опасному сценарию 2а тяжелые повреждения может получить одно-двухэтажная застройка из кирпича и оштукатуренного дерева (тип А, Б по шкале MMSK-86) в юго-западной части города (рис. 8а). Здания типа В по шкале MMSK-86, расположенные в микрорайоне “Курортная зона”, могут получить умеренные повреждения. В этом микрорайоне расположены основные санаторно-курортные комплексы с высоким процентом зданий с открытым пространством на нижних этажах. Такие конструкции характеризуются высокой уязвимостью к сейсмическим воздействиям. На территории микрорайонов 1–4, застроенных современными многоэтажными домами (тип С7, С8 по шкале MMSK-86), расчетная

Таблица 5. Распределение степеней повреждения застройки для отдельных городов СК для сценарных событий 2а и 3а (см. табл. 3, рис. 2)

Показатель	Пятигорск		Кисловодск		Ессентуки		Минеральные воды		Георгиевск	
	2а	3а	2а	3а	2а	3а	2а	3а	2а	3а
Δ , км	48	14	18	40	32	30	60	26	81	27
$d0^*$	0.15	0.02	0.03	0.12	0.06	0.10	0.15	0.08	0.3	0.03
$d1$	0.19	0.09	0.1	0.17	0.12	0.16	0.2	0.23	0.29	0.09
$d2$	0.29	0.17	0.18	0.28	0.22	0.27	0.29	0.13	0.25	0.16
$d3$	0.24	0.26	0.27	0.26	0.28	0.27	0.24	0.28	0.13	0.25
$d4$	0.11	0.27	0.26	0.13	0.22	0.15	0.1	0.20	0.03	0.27
$d5$	0.02	0.19	0.16	0.04	0.1	0.05	0.02	0.08	–	0.20
d_{cp}	2.0	3.2	3.1	2.2	2.8	2.3	2.0	2.6	1.3	3.2

* $d0$ – нет повреждений.

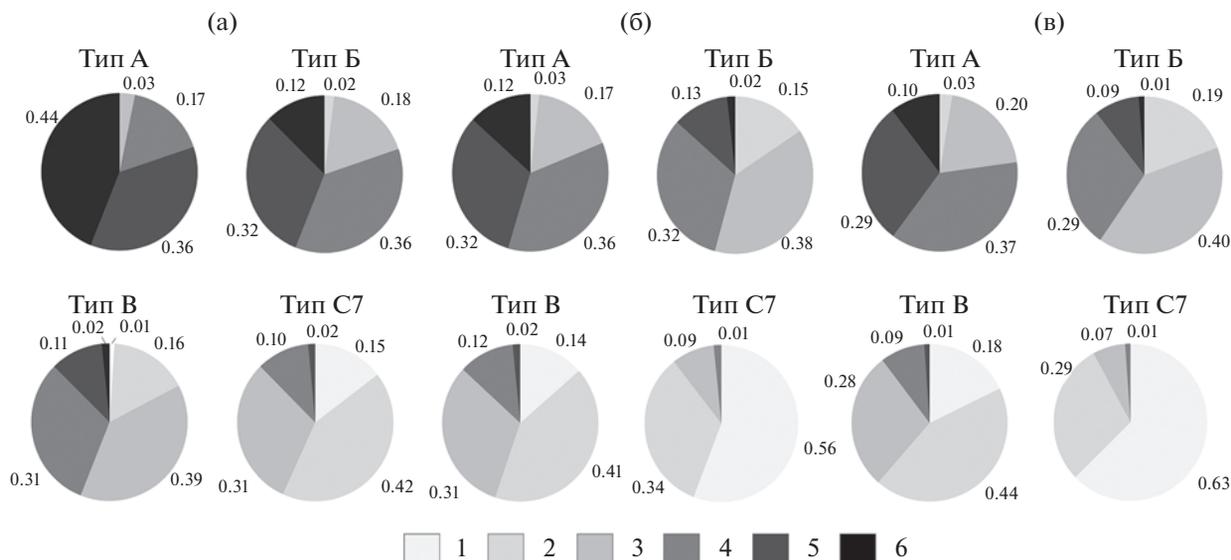


Рис. 7. Распределение степеней повреждения зданий разного типа по шкале MMSK-86 [25] в городах: а – Пятигорск, б – Ессентуки, в – Кисловодск. 1–6 – степени повреждения: 1 – d_0 , 2 – d_1 , 3 – d_2 , 4 – d_3 , 5 – d_4 , 6 – d_5 .

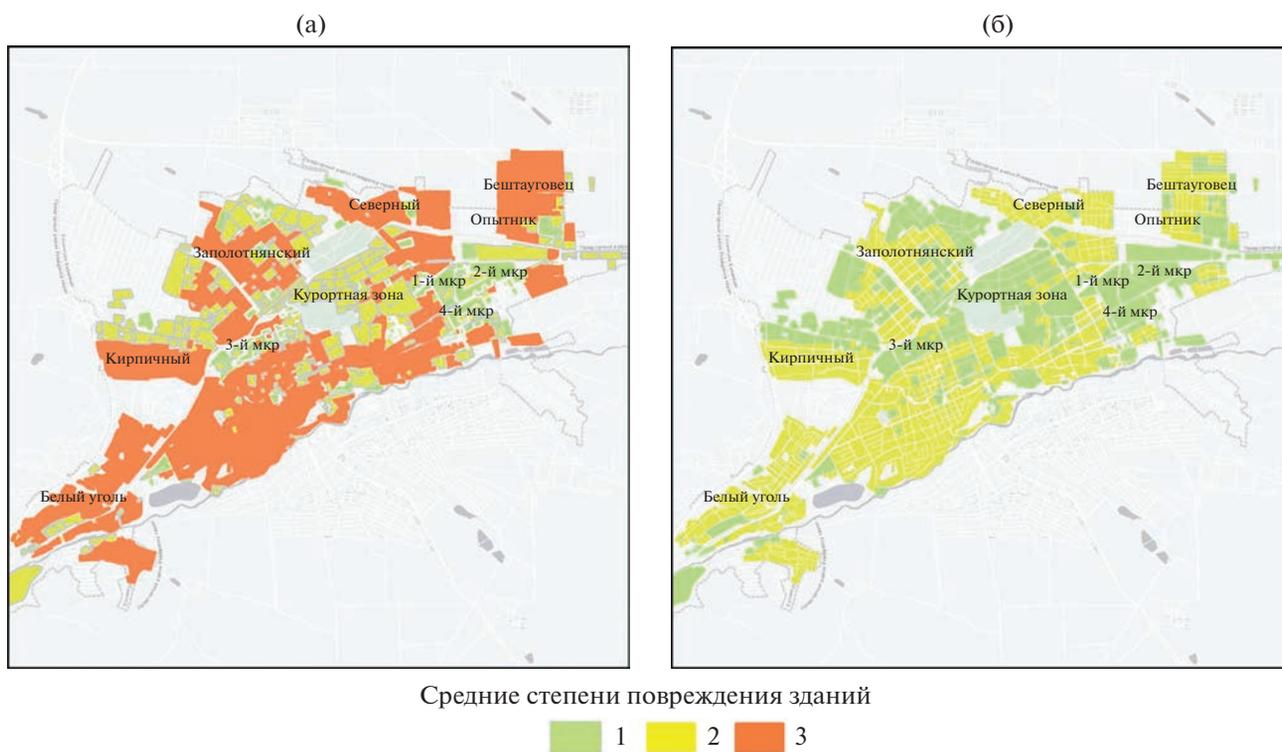


Рис. 8. Распределение расчетных средних степеней повреждения $d_{ср}$ типовой застройки г. Ессентуки: а – сценарное событие 2а; б – сценарное событие 2в. 1–3 – степени повреждения: 1 – нет повреждений или легкие повреждения (d_0 и d_1), 2 – умеренные (d_2), 3 – тяжелые (d_3).

степень повреждения d_1 – легкие повреждения. К северу и югу от этих микрорайонов расположена зона малоэтажной застройки (тип А, Б по шкале MMSK-86), расчетные степени ее повреждения достигают значений d_3 .

По наиболее вероятному сценарию 2в (табл. 3, рис. 2) умеренные повреждения может получить малоэтажная застройка (рис. 8б). Остальная часть зданий не получит повреждений или получит легкие повреждения.

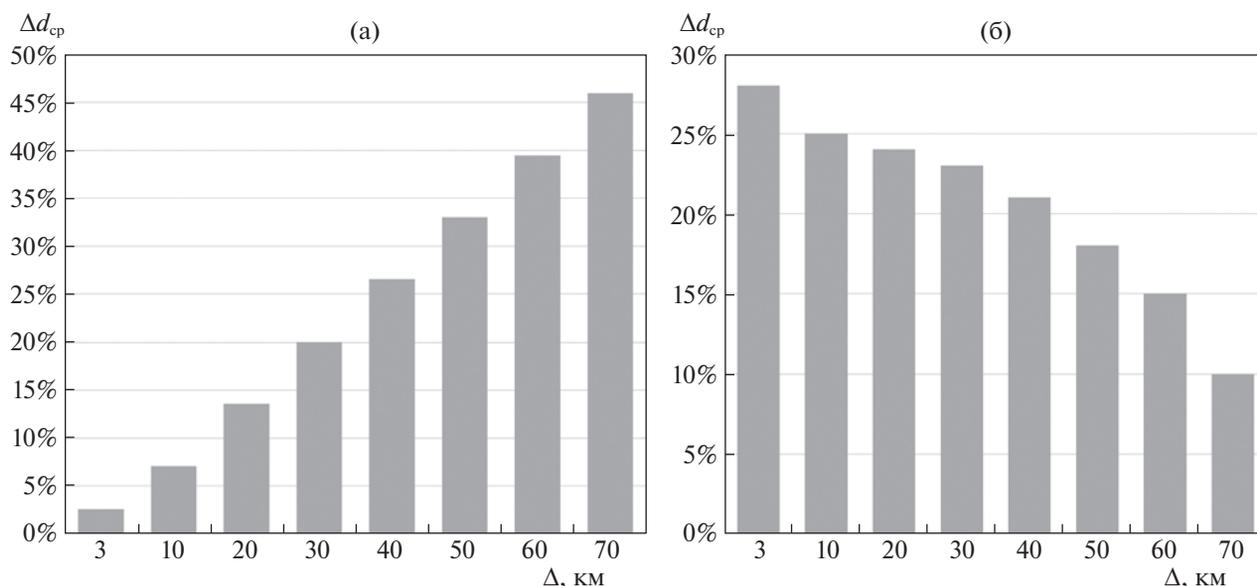


Рис. 9. Расхождение расчетных средних степеней повреждений d_{cp} при разной ориентации эллипса макросейсмического поля (а) и разной глубине очага сценарного землетрясения (б).

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА ПОСЛЕДСТВИЙ СЦЕНАРНЫХ СОБЫТИЙ

На рис. 9а показано влияние ориентации эллипса макросейсмического поля на значения расчетных средних степеней повреждения d_{cp} застройки в населенном пункте. Расхождение расчетных d_{cp} для разных ориентаций ($\zeta = 40^\circ$ и $\zeta = 320^\circ$) на эпицентральных расстояниях $\Delta \leq 10$ км составляет 3–6%; при $\Delta > 70$ км оно может достигать 45%.

На рис. 9б показано влияние глубины очага h на расчетные средние степени повреждения d_{cp} зданий. В зависимости от глубины очага сценарного события разница в оценках степеней повреждений может достигать 27% на расстояниях $\Delta \leq 3$ км.

Совместный анализ табличных и визуальных данных (см. рис. 4, 6), полученных с помощью системы “Экстремум”, показывает, что для сценарных событий 2в и 3в (см. табл. 3) максимально возможные, близкие к 10 баллам значения интенсивности в эпицентральной зоне I_0 , возможны при $M = 5.5$ и глубине очага $h = 3$ км. При этом вероятны средние степени повреждения $d_{cp} = 4$ (частичные разрушения) и $d_{cp} = 5$ (обвалы).

При реализации событий 2г и 3г с глубиной очага $h = 13.5$ км (см. табл. 3) максимальные значения интенсивности I_0 могут составить 7–8 баллов по шкале MSK-64. Расчетная средняя степень повреждения зданий d_{cp} в населенных пунктах в этом случае может достигать d_3 (тяжелые повреждения).

При увеличении магнитуды сценарного события с $M = 5.5$ до $M = 6.0$ расчетные средние степени повреждения зданий в курортных городах Кавминводской зоны изменяются с $d_{cp} = 2$ до $d_{cp} = 3$ (см. рис. 6). При $d_{cp} = 3$ (см. табл. 6) отдельные здания в городах курортной зоны могут получить более высокие степени повреждения вплоть до частичного разрушения и даже обвалов.

При реализации события 3а (см. табл. 3) в Пятигорске и Георгиевске до 20% зданий могут получить степень повреждения d_5 . При реализации события 2а в Кисловодске более 40% зданий могут получить степени повреждений d_4 и d_5 (см. табл. 6) При этом от 2 до 12% зданий в курортных городах при сценарных событиях 2а и 3а останутся неповрежденными.

Здания типа А в курортной зоне (см. рис. 7) могут получить сильные повреждения вплоть до полного обрушения.

Расчеты последствий сценарных событий с $M = 5.5$ и $M = 6$, выполненные для г. Ессентуки, показывают аналогичное поведение зданий типа А и Б по шкале MMSK-86.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По данным сети ФИЦ ЕГС РАН на Северном Кавказе по регистрации сейсмических событий широкого спектра магнитуд с $M \geq 1$, территория Ставропольского края является частью умеренно сейсмоактивного Центрального Предкавказья, которая за последнее двадцатилетие характеризуется современной активизацией сейсмической активности. В изучаемом районе известны силь-

ные и ощутимые землетрясения. Землетрясение 1 апреля 2023 г. с магнитудой $m_b = 4.4$ в этом районе проявилось интенсивностью до 4 баллов и вызвало волнения среди населения Кавказских Минеральных Вод и широкий резонанс в средствах массовой информации.

На территории Центрального Предкавказья выделяются четыре крупные неотектонические структуры: Восточно-Кубанский прогиб, Ставропольский свод, Минераловодский выступ и Терско-Каспийский прогиб [20, 22]. Наиболее сейсмоактивным является район Кавказских Минеральных Вод [14, 15].

Последние годы в результате детальных исследований по оценке сейсмической опасности Северного Кавказа, в частности западной части Ставропольского края [1, 11, 16, 19, 21, 22], были разработаны карты зон ВОЗ рассматриваемого региона. По детальным оценкам [22] некоторая часть территории края относится к зонам ВОЗ ($M_{\max} = 6-7$), центральная ее часть к ($M_{\max} = 5.0-5.5$), а с юга и востока территории соседствуют зоны с $M_{\max} = 7$.

При выборе параметров сценарных событий, наиболее опасных для курортных городов Кавминводской зоны, были использованы карта зон ВОЗ, подготовленная коллективом ИФЗ РАН под руководством Е.А. Рогожина, и карта доменов согласно актуализированной линеаментно-доменно-фокальной модели зон возникновения очагов землетрясений для Ставропольского края, подготовленная в рамках работ по созданию комплекта карт ОСР-2016 [16].

Расчеты последствий сценарных событий с $M = 6$ и $M = 5.5$ выполнены с применением системы “Экстремум” на региональном уровне и уровне города.

В случае сценарных событий с $M = 6$ расчетные значения средних степеней повреждения застройки $d_{\text{ср}}$ в курортных городах могут варьировать от 2.8 до 3.6. Наиболее тяжелые повреждения вплоть до полного обрушения могут получить здания типа А, в курортных городах их процент изменяется от 10 до 44%. Здания типа Б могут получить тяжелые повреждения вплоть до полного обрушения, процент таких зданий значительно ниже: от 1 до 12%.

Актуализированная в настоящем исследовании поквартальная застройка г. Ессентуки позволила смоделировать возможные степени повреждения застройки в случае сценарных событий с $M = 6$ при $h = 15$ км и $M = 5.5$ при $h = 3$ км для отдельных кварталов города. В случае события с $M = 6$ в микрорайоне “Курортная зона”, где расположены основные санаторно-курортные комплексы, здания могут получить умеренные повреждения. В микрорайонах 1–4 расчетная степень повреждения соответствует легким повреждени-

ям, а к северу и югу от этих микрорайонов застройка может получить тяжелые повреждения. В случае события с $M = 5.5$ застройка г. Ессентуки может получить легкие и умеренные повреждения.

Результаты настоящего исследования свидетельствуют о целесообразности продолжения работ по калибровке системы “Экстремум” и необходимости проведения превентивных мероприятий для обеспечения сейсмобезопасности населения, в первую очередь, усиления зданий от сейсмических воздействий.

Авторы выражают благодарность сотрудникам ИФЗ РАН А.Д. Завьялову и С.А. Перетокину за предоставление цифровой информации по оценке сейсмической опасности в соответствии с картами ОСР-2016 на изучаемую территорию; а также признательность коллективу Центра исследований экстремальных ситуаций за их вклад в развитие системы “Экстремум” и коллегам из ФИЦ ЕГС РАН за плодотворное сотрудничество.

Статья подготовлена в рамках выполнения государственного задания ИГЭ РАН по теме НИР № 122022400105-9 “Прогноз, моделирование и мониторинг эндогенных и экзогенных геологических процессов для снижения уровня их негативных последствий” и государственного задания ФИЦ ЕГС РАН № 075- 01271-23.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акимов В.А., Зайцев В.А., Ларьков А.С., Лутиков А.И. и др. Карты сейсмической опасности Северо-Западного и Центрального Кавказа в детальном масштабе // Вопросы инженерной сейсмологии. 2019. Т. 46. № 4. С. 57–74.
2. Ананьин И.В. Сейсмичность Северного Кавказа. М.: Наука, 1977. 148 с.
3. Бабаян Т.О., Кулиев Ф.Т., Папалашвили В.Г., Шебалин Н.В., Вандышева Н.В. II б. Кавказ [50–1974 гг., $M \geq 4.0$, $10 \geq 5$] // Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г. М.: Наука, 1977. С. 69–170.
4. Габсатарова И.П., Девяткина Л.В., Иванова Л.Е. и др. Суворовское землетрясение 22 июля 2006 г. с $K_p = 11.3$, $I_0^P = 5-6$ (Ставропольский край) // Землетрясения Северной Евразии 2006 год. Обнинск: ФГБУН ГС РАН, 2012. С. 340–350.
5. Габсатарова И.П., Королецки Л.Н., Иванова Л.Е. и др. Землетрясение Заветненское 2 мая 2012 г. с $K_p = 11.2$, $M_{w\text{рег}} = 4.3$, $I_0^P = 5$ и Воронсколесское-II 15 декабря 2012 г. с $K_p = 10.8$, $M_{w\text{рег}} = 4.2$, $I_0^P = 4$ (Ставропольский край) // Землетрясения Северной Евразии 2012. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2018. С. 79–94.
6. Зарайский М.П., Добрыченко А.В., Казин Э.А. Новичкая Н.А. Ставропольское землетрясение 2 октября 1971 г. // Землетрясения в СССР в 1971 году. М.: Наука, 1975. С. 32–35.

7. *Казин Э.А.* Кавминводское землетрясение 28 февраля 1978 г. // Сейсмологический бюллетень Кавказа. 1979. Тбилиси: Мецниереба, 1982. С. 215–226.
8. *Ларионов В.И., Фролова Н.И.* Особенности оценки уязвимости для сейсмических воздействий // Природные опасности России: монография. Т. 6: Оценка и управление природными рисками / Под ред. А.Л. Рагозина. М.: Изд. фирма “КРУК”, 2003. С. 120–130.
9. *Ларионов В.И., Суцев С.П., Угаров А.Н., Фролова Н.И.* Оценка сейсмического риска с применением ГИС-технологий // Природные опасности России: монография. Т. 6: Оценка и управление природными рисками / Под ред. А.Л. Рагозина. М.: Изд. Фирма “КРУК”, 2003. С. 209–231.
10. *Ларионов В.И., Фролова Н.И., Угаров А.Н., Суцев С.П. и др.* Оценка сейсмического риска // Геоэкология. 2017. № 2. С. 11–26.
11. *Лутиков А.И., Рогожин Е.А., Овсяченко А.Н.* Методика оценки сейсмической опасности на стадии уточнения исходной сейсмичности // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных: матер. Третьей Междунар. сейсмологической школы. Обнинск: ГС РАН, 2008. С. 81–86.
12. *Медведев С.В., Шпонхойер В., Карник В.* Шкала сейсмической интенсивности MSK-64. М.: МГК АН СССР, 1965. 11 с.
13. *Милановский Е.Е., Расцветаев Л.М., Кухмазов С.У., Бирман А.С. и др.* Новейшая геодинамика Эльбурско-Минераловодской области Северного Кавказа // Геодинамика Кавказа. М.: Наука, 1989. С. 99–105.
14. *Никонов А.А.* Значительные землетрясения и сейсмический потенциал района Кавказских минеральных вод (по макросейсмическим данным) // Физика Земли. 1994. № 2. С. 10–19.
15. *Никонов А.А., Рейснер Г.И.* Оценка сейсмического потенциала Кавказа с учетом палеосейсмологических и сеймотектонических данных // Катастрофические процессы и их влияние на природную среду. Т. 2. Сейсмичность. М.: Регион. обществ. орг. ученых по проблемам прикладной геофизики, 2002. С. 381–400.
16. Общее сейсмическое районирование территории Российской Федерации. Пояснительная записка к комплекту карт ОСР-2016 и список населенных пунктов, расположенных в сейсмоактивных зонах // Инженерные изыскания. 7/2016. С. 49–121.
17. *Папалашвили В.Г., Баграмян А.Х., Гоцадзе О.В.* Землетрясения Кавказа // Землетрясения в СССР в 1978 году. М.: Наука, 1982. С. 11–19.
18. *Рейснер Г.И., Йогансон Л.И., Рейснер М.Г., Баранов Ю.Е.* Типизация земной коры и современные геологические процессы. М.: ИФЗ, 1993. 207 с.
19. *Рогожин Е.А.* Современная геодинамика и потенциальные очаги землетрясений Кавказского региона // Современные математические и геологические модели природной среды. М.: ОИФЗ РАН, 2002. С. 244–254.
20. *Рогожин Е.А., Нечаев Ю.В., Солодилов Л.Н., Исмаил-заде Т.А.* Тенденция развития сейсмичности Кавказа и сейсмогенерирующие зоны Ставрополья // Разведка и охрана недр. 1998. № 2. С. 23–27.
21. *Рогожин Е.А., Лутиков А.И., Овсяченко А.Н. и др.* Оценка сейсмической опасности Северного Кавказа в детальном масштабе // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2013. № 5. С. 14–19.
22. *Рогожин Е.А., Овсяченко А.Н., Лутиков А.И., Собищев А.Л. и др.* Эндогенные опасности Большого Кавказа. М.: ИФЗ РАН, 2014. 256 с.
23. *Фабрициус В.З., Фабрициус З.Е., Шавкань П.В. и др.* Верхнее-Янкульское землетрясение 19 октября 1999 года с $M_s = 4.4$, $I_0 = 6-7$ (Северный Кавказ) // Землетрясения Северной Евразии в 1999 году. Обнинск: ФОП, 2005. С. 311–322.
24. *Фролова Н.И., Габсатарова И.П., Лутиков А.И., Суцев С.П., Малаева Н.С.* Оценка сейсмического риска на территории Ставропольского края // Геофизические процессы и биосфера. 2022. Т. 21. № 3. С. 111–136.
25. *Шебалин Н.В., Еришов И.А., Шестоперов Г.С., Гехман А.С.* Улучшенный вариант шкалы сейсмической интенсивности (MMSK-86) на базе шкал MSK-64 и MCCCC-73 (заключительный отчет). М.: MCCCC, ИФЗ, 1986. 61 с.

A POSSIBLE IMPACT OF SCENARIO EARTHQUAKES IN THE CAUCASIAN MINERAL WATERS ZONE

N. I. Frolova^{a, #}, I. P. Gabsatarova^{b, ##}, V. I. Larionov^{a, c}, S. P. Suchshev^{c, ###},
N. S. Malaeva^a, and G. Yu. Dontsova^b

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

^bGeophysical Survey, Russian Academy of Sciences,
pr. Lenina, 189, Obninsk, 249035 Russia

^cBauman Moscow State Technical University,
2-ya Baumanskaya, ul. 5, Moscow, 105005 Russia

[#]E-mail: frolovanina7@gmail.com

^{##}E-mail: ira@gstras.ru

^{###}E-mail: Sersan150@mail.ru

This paper analyzes a possible impact of scenario earthquakes in the zones of high seismic hazard in order to justify measures for ensuring population safety by the example of the southern Stavropol krai area. Over the

past twenty years, the Central CisCaucasus region shows elevated seismicity based on the data recorded by the Geophysical Survey RAS network, reporting the occurrence of seismic events within a wide range of magnitudes, $M \geq 1$. One of the last felt events with $m_b = 4.4$ occurred in the studied area on April 1, 2023, producing shaking intensity of 3 to 4 grades on the MSK-64 scale in large resort cities of the region. The parameters for the scenario events are based on the results of detailed seismic zoning (DSZ) and review seismic zoning (RSZ-2016) obtained by the Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS. The Extremum system was used to assess felt effects in resort centers located in the southern Stavropol krai. We analyzed the influence of seismic intensity propagation and the parameters of macroseismic field equation on the assessed impact of the scenario earthquakes. Special attention was paid to the depths of strong and moderate events in the considered area of the Northern Caucasus and to the orientation of macroseismic isoseismals. Pre-calibration of the Extremum system loss models is recommended. Estimates of possible simulated damage due to scenario earthquakes with $M=6.0$ and $M=5.0$ for individual large resort cities of the Kavminvody zone are given. The results can be used in the development of both preventive measures and response plans in case of possible events in the region.

Keywords: *Extremum system, zones of possible earthquake generation, earthquake effects, scenario events, Stavropol krai, Caucasian Mineral Waters zone*

REFERENCES

1. Akimov, V.A., Zaitsev, V.A., Lar'kov, A.S., Lutikov, A.I. et al. Maps of seismic hazard of the Northwestern and Central Caucasus on a detailed scale. *Voprosy inzhenernoi seismologii*, 2019, vol. 46, no. 4, pp. 57–74. (in Russian)
2. Anan'in, I.V. Seismicity of the Northern Caucasus. Moscow, Nauka Publ., 1977, p. 148. (in Russian)
3. Babayan, T.O., Kuliev, F.T., Papalashvili, V.G., Shebalin, N.V., Vandysheva N.V. Greater Caucasus (50–1974, $M \geq 4.0$, $I_0 \geq 5$). In: New catalogue of strong earthquakes in the USSR territory from ancient ages to 1975. Moscow, Nauka Publ., 1977, pp. 69–170. (in Russian)
4. Gabsatarova, I.P., Devyatkina, L.V., Ivanova, L.E. et al. Suvorovskoe earthquake on July 22, 2006 with $K_p = 11.3$, $I_0^P = 5-6$ (Stavropol krai). In: Earthquakes in the Northern Eurasia, 2006. Obninsk, 2012, pp. 340–350. (in Russian)
5. Gabsatarova, I.P., Koroletski, L.N., Ivanova, L.E. et al. Zavetnenskoe earthquake on May 2, 2012 with $K_p = 11.2$, $M_{w,reg} = 4.3$, $I_0^P = 5$ and Vorovskoleskoe-II earthquake on December 15, 2012 with $K_p = 10.8$, $M_{w,reg} = 4.2$, $I_0^P = 4$ (Stavropol krai). In: Earthquakes of Northern Eurasia 2012]. Obninsk, 2018, pp. 79–94. (in Russian)
6. Zaraiskii, M.P., Dobrychenko, A.V., Kazin, E.A. Novitskaya, N.A. Stavropol earthquake on October 2, 1971. In: Earthquakes in the USSR, 1971. Moscow, Nauka Publ., 1975, pp. 32–35. (in Russian)
7. Kazin, E.A. Caucasian Mineral Waters earthquake on February 28, 1978. In: Seismological bulletin of the Caucasus, 1979. Tbilisi, Metsniereba Publ., 1982, pp. 215–226. (in Russian)
8. Larionov, V.I., Frolova, N.I. [Peculiarities of vulnerability assessment for seismic impacts. In: Natural Hazards of Russia. Vol. 6: Assessment and management of natural risks. A.L. Ragozin, Ed., Moscow, KRUK Publ., 2003, pp. 120–130. (in Russian)
9. Larionov, V.I., Sushchev, S.P., Ugarov, A.N., Frolova, N.I. Seismic risk assessment using GIS technologies. In: [Natural Hazards of Russia. Vol. 6: Assessment and management of natural risks. A.L. Ragozin, Ed., Moscow, KRUK Publ., 2003, pp. 209–231. (in Russian)
10. Larionov, V.I., Frolova, N.I., Ugarov, A.N., Sushchev, S.P. et al. Seismic risk assessment. *Geoekologiya*, 2017, no. 2, pp. 11–26. (in Russian)
11. Lutikov, A.I., Rogozhin, E.A., Ovsyuchenko, A.N. Seismic hazard assessment method at the initial seismicity refinement stage. In: [Modern methods of processing and interpretation of seismological data. Proc. the 3rd Intern. seismological school. Obninsk, GS RAN Publ., 2008, pp. 81–86. (in Russian)
12. Medvedev, S.V., Shponkhoier, V., Karnik, V. Seismic intensity scale MSK-64. Moscow, MGC AS USSR Publ., 1965, 11 p. (in Russian)
13. Milanovskii, E.E., Rastsvetaev, L.M., Kukhmazov, S.U., Birman, A.S. et al. The latest geodynamics of the Elbrus – Caucasian Mineral Waters region, the Northern Caucasus. In: The Caucasus geodynamics. Moscow, Nauka Publ., 1989, pp. 99–105. (in Russian)
14. Nikonov, A.A. Significant earthquakes and seismic potential of the Caucasian Mineral Waters region (according to macroseismic data). *Fizika Zemli*, 1994, no. 2, pp. 10–19. (in Russian)
15. Nikonov, A.A., Reisner, G.I. Assessment of the seismic potential in the Caucasus with the account of paleoseismological and seismotectonic data. In: Catastrophic processes and their impact on the natural environment. vol. 2. Seismicity. Moscow, Regional Public Organization of Scientists on Applied Geophysics Problems Publ., 2002, pp. 381–400. (in Russian)
16. General seismic zoning of the Russian Federation territory. Explanatory note to the set of OSR-2016 maps and a list of settlements located in seismically active zones. *Inzhenernye izyskaniya*, 2016, no. 7/2016, pp. 49–121. (in Russian)
17. Papalashvili, V.G., Bagramyan, A.Kh., Gotsadze, O.V. The Caucasus Earthquakes. In: Earthquakes in the USSR in 1978. Moscow, Nauka Publ., 1982, pp. 11–19. (in Russian)
18. Reisner, G.I., Ioganson, L.I., Reisner, M.G., Baranov, Yu.E. Typification of the Earth's crust and mod-

- ern geological processes. Moscow, IFZ Publ., 1993, 207 p. (in Russian)
19. Rogozhin, E.A. Modern geodynamics and potential sources of earthquakes in the Caucasus region. *Modern mathematical and geological models of the natural environment*, Moscow, OIFZ RAN Publ., 2002, pp. 244–254. (in Russian)
 20. Rogozhin, E.A., Nechaev, Yu.V., Solodilov, L.N., Ismail-zade, T.A. The trend in the development of the seismicity of the Caucasus and the seismogenic zones of the Stavropol Territory. *Razvedka i okhrana nedr*, 1998, no. 2, pp. 23–27. (in Russian)
 21. Rogozhin, E.A., Lutikov, A.I., Ovsyuchenko, A.N., et al. Evaluation of the seismic hazard of the Northern Caucasus on a detailed scale. *Seismostoikoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenii*, 2013, no. 5, pp. 14–19. (in Russian)
 22. Rogozhin, E.A., Ovsyuchenko, A.N., Lutikov, A.I., Sobisevich A.L., et al. Endogenous hazards of the Greater Caucasus. Moscow, IFZ RAN Publ., 2014, 256 p. (in Russian)
 23. Fabritsius, V.Z., Fabritsius, Z.E., Shavkan', P.V., et al. Upper-Yankul earthquake on October 19, 1999 with $M_s = 4.4$, $I_0 = 6-7$ (Northern Caucasus. In: Earthquakes of Northern Eurasia in 1999. Obninsk, FOP Publ., 2005, pp. 311–322. (in Russian)
 24. Frolova, N.I., Gabsatarova, I.P., Lutikov, A.I., Sushchev, S.P., Malaeva, N.S. Seismic risk assessment in the Stavropol krai. *Geofizicheskie protsessy i biosfera*, 2022, vol. 21, no. 3, pp. 111–136. (in Russian)
 25. Shebalin, N.V., Ershov, I.A., Shestoporov, G.S., Gekhman, A.S. [An improved version of the seismic intensity scale (MMSK-86) based on the MSK-64 and MSSSS-73 scales (final report). Moscow, MSSSS, IFZ Publ., 1986, 61 p. (in Russian)

ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ ПРИРОДНЫХ И ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 624.131.1:551.3

ВОДОПОНИЖЕНИЕ КАК ВЕДУЩИЙ ФАКТОР РАЗВИТИЯ СУФФОЗИИ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ФУНДАМЕНТОВ ГЛУБОКОГО ЗАЛОЖЕНИЯ

© 2023 г. П. И. Кашперюк^{1,*}, Д. С. Москалев^{2,**}, В. П. Хоменко^{1,***}

¹ФГБУ ВО “Национальный исследовательский университет
Московский государственный строительный университет” (НИУ МГСУ),
Ярославское шоссе, 26, Москва, 129337 Россия

²Научно-производственная фирма “Специальные изыскания для высотного строительства”,
ул. Архитектора Власова, 45А, Москва, 117393 Россия

*E-mail: npf-sivs@yandex.ru

**E-mail: cangaro@mail.ru

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

Поступила в редакцию 08.11.2022 г.

После доработки 26.04.2023 г.

Принята к публикации 04.05.2023 г.

В статье рассмотрены основные техногенные факторы, приводящие к развитию механической суффозии в процессе строительства и эксплуатации зданий и сооружений с глубоким заложением фундаментов. На конкретном объекте исследованы причины и динамика развития восходящего суффозионного процесса “вулканического” характера (“псевдовулканической суффозии”). Установлено, что основными факторами, обусловившими развитие суффозионного процесса являются постоянные откачки поступающих в дренажную систему напорных вод, находящихся в активной зоне основания сооружения, и систематически поддерживаемый высокий гидравлический градиент. Доказывается, что необходимость постоянного водопонижения, поступающих в дренажную систему подземных вод, связана не с качественными дефектами сооруженного противофильтрационного экрана – “стены в грунте”, а с нарушением сплошности толщи верхнего водоупора, являющегося непосредственным грунтом основания, при производстве строительных работ самой “стены в грунте” и свайных фундаментов. Результаты исследований позволили впервые оценить возможности применения двух методов определения развития процесса восходящей суффозии во времени: измерения скважностей каверномером и определения объема вертикальных пустот методом их засыпки песком. На основе законов гидродинамики сделана попытка определения скорости движения восходящего потока и величины гидродинамического напора. Отмечается, что важнейшим условием производства инженерных изысканий, при выявлении в грунтах основания межпластовых высоконапорных водоносных горизонтов, должно являться обязательное тампонирующее разведочных скважин высокомарочным бетонным раствором в интервале глубин залегания подошвы верхнего водоупора и, как минимум, проектной отметки дна котлована, сразу после окончания бурения скважин до организации мероприятий по водопонижению.

Ключевые слова: механическая суффозия, псевдовулканическая суффозия, связный и несвязный грунты, градиент напора, фильтрационный поток, размываемость грунтов, водопонижение, вертикальный противофильтрационный экран, коррозия

DOI: 10.31857/S0869780923030049, EDN: WMOLHF

ВВЕДЕНИЕ

Современное строительство заглубленных подземных сооружений, как правило, основывается на необходимости осуществления водопонижения приповерхностных подземных вод в период производства строительных работ, а в отдельных случаях и при эксплуатации сооружений. Основным конструктивным решением для защиты разрабатываемых котлованов от водопритоков в них подземных вод является возведение “стены в

грунте”. Реализация проектного решения по строительству “совершенного” вертикального противофильтрационного экрана предполагает исключение естественного повышения уровня подземных вод в пределах площади котлована. Однако практика строительства вертикальных противофильтрационных экранов свидетельствует, что “стена в грунте” во многих случаях не обеспечивает надежной гидроизоляции.

Дефекты экранирования котлованов от поступления грунтовых и межпластовых безнапор-

ных вод связаны исключительно с несовершенством технологий возведения “стены в грунте”, допускающих возможность протечек подземных вод сквозь бетонное ограждение, т.е. обусловлены качеством их строительства. В связи с этим, в зависимости от геологического строения участков, для устранения возможных протечек “стены в грунте” в период эксплуатации сооружения проектировщики предусматривают дополнительное строительство вертикального пристенного дренажа, часто совмещая его с пластовым. Такие проектные решения в большинстве случаев предполагают систематическую откачку подземных вод из дренажной системы в течение всего периода эксплуатации сооружения, что в конечном итоге значительно повышает эксплуатационные расходы.

Аналогичные проектные решения были реализованы на недостроенном жилом комплексе в районе станции метро “Юго-западная” в Москве. Его строительство было приостановлено в 2008 г. из-за необходимости откачки более чем 320 м³/сут воды из пластового дренажа с глубины 13.0 м. Подземная часть здания и инженерно-геологический разрез участка показаны на рис. 1.

На представленном инженерно-геологическом разрезе выделяются два слоя четвертичных водно-ледниковых супесчано-песчаных, песчаных и дресвяно-щебнистых отложений. Верхний из них представлен среднечетвертичными водно-ледниковыми песками мелкими, средней плотности, водонасыщенными, с прослоями и линзами супеси песчанистой и залегает на глубинах 3.7–7.3 м. По гранулометрическому составу пески неоднородны, коэффициенты их неоднородности варьируют в пределах 3.1–8.0, по степени суффозионности они в целом не суффозионные. Учитывая незначительную мощность песков (0–2.2 м), их невыдержанность (прерывистость) по простиранию, маломощность грунтовых вод (не более 2.4 м), низкие значения возможных гидравлических градиентов и низкие значения коэффициентов фильтрации (0.8–2.8 м/сут), вероятность проявления суффозии в этих песках оценивается как весьма низкая.

Что касается второго (нижнего) слоя водовмещающих нижнечетвертичных водно-ледниковых и озерно-ледниковых песков различной крупности (мелких, средней крупности, местами крупных и гравелистых), а также дресвяно-щебнистых грунтов с песчаным заполнителем, перекрытых мощной толщей (10.0–17.2 м) моренных суглинков, то для них также характерна значительная неоднородность по гранулометрическому составу, и они являются потенциально суффозионно неустойчивыми. При этом пески средней крупности и пылеватые являются слабосуффозионны-

ми, а дресвяно-щебнистые грунты – сильно суффозионными.

Однако, учитывая глубины залегания (19.0–21.0 м от поверхности земли) этих грунтов, наличие толщи перекрывающих водонепроницаемых моренных суглинков (5.0–13.0 м ниже дна котлована), значительные отметки пьезометрического уровня водоносного горизонта (до 170.0 м), следовательно, и малую вероятность естественного возникновения значительных гидравлических градиентов, формирование естественного суффозионного процесса в этих грунтах также маловероятно.

Предложенный авторами состав изысканий и выполненный на объекте комплекс инженерно-геологических исследований позволили установить причины интенсивного затопления подземной части здания, выявить условия активного развития восходящего суффозионного процесса “вулканического” характера и оценить его динамику.

УСЛОВИЯ РАЗВИТИЯ СУФФОЗИОННОГО ПРОЦЕССА

Как показано на рис. 1, в сформировавшихся техногенных условиях при систематической откачке подземных вод из дренажной системы глубокого заложения создаются все необходимые условия для активного развития суффозионных процессов. На основании публикаций таких известных исследователей, как В.П. Хоменко, А.В. Аникеев, А.Д. Кочев, С.В. Щербаков и др. [1–4, 6, 8, 10, 11] становится очевидным, что для образования суффозионных деформаций необходима реализация следующих условий:

– присутствие в геологическом разрезе обводненных неоднородных по гранулометрическому составу несвязных грунтов;

– высокие значения гидравлического градиента и гидродинамического воздействия подземных природных или техногенных вод, движущихся со скоростью, достаточной для размывания и выноса наиболее мелких частиц из несвязных грунтов;

– наличие свободного пространства, в которое может аккумулироваться разрушенный механической суффозией материал.

В рассматриваемом случае при разработке глубокого котлована внутри “стен в грунте” все перечисленные выше условия реализуются, при этом, как правило, имеют место значительные, связанные с глубиной котлована, величины гидростатических и гидродинамических давлений, а местом аккумуляции вымываемых и переносимых частиц грунта является щебнисто-дресвяная толща пластового дренажа.

В данной ситуации имеет место по-своему уникальный феномен суффозионного разруше-

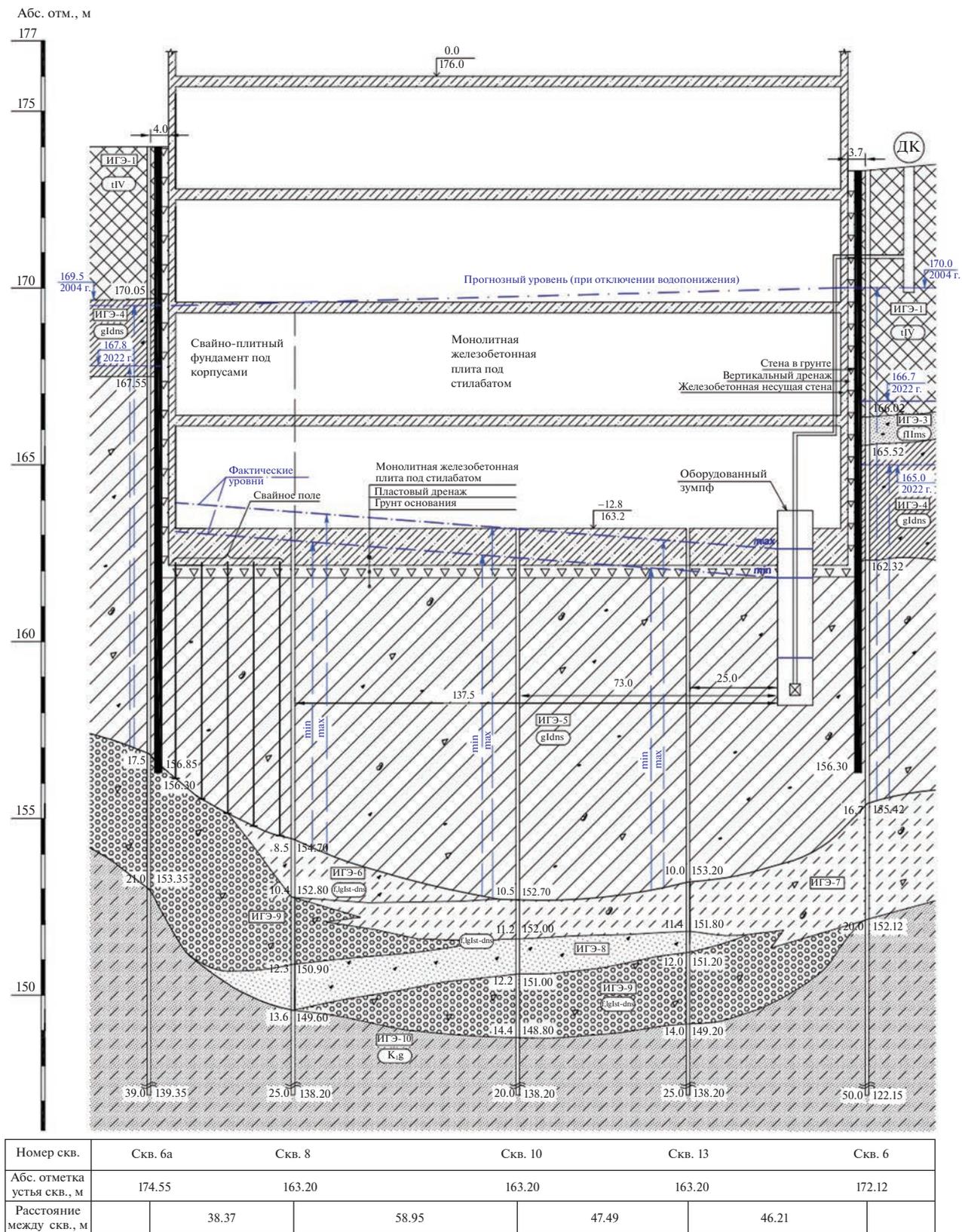


Рис. 1. Инженерно-геологический разрез площадки строящегося здания.

Условные обозначения

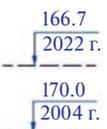
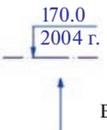
tIV		ИГЭ-1	Насыпной грунт – суглинок легкий песчанистый, темно-серый, тугопластичный, и песок различной крупности, рыхлый местами средней плотности, влажный и водонасыщенный, с включениями щебня и гравия, щепы древесины, обломков бетона, крошки кирпича. Местами на различных глубинах встречаются крупные обломки железобетонных блоков и плит. Насыпь слежавшаяся
fIIms		ИГЭ-3	Песок мелкий, прослоями средней крупности, местами пылеватый, неоднородный, средней плотности, водонасыщенный, редко в верхней части слоя влажный, коричнево-серый и буровато-серый, с включениями до 20% дресвы и гравия
gIdns		ИГЭ-4	Суглинок легкий песчанистый, тугопластичный, прослоями полутвердый, буровато-коричневый, ненабухающий, среднепучинистый, с включениями гравия, дресвы и щебня 5–10%, с гнездами и линзами песка мелкого и средней крупности, плотного, влажного и водонасыщенного
gIdns		ИГЭ-5	Суглинок легкий песчанистый, полутвердый, прослоями тугопластичный, местами в нижней части слоя твердый, коричнево-серый, ненабухающий, среднепучинистый, с включениями гравия, дресвы и щебня 5–10%, с гнездами и линзами песка мелкого и средней крупности, плотного, влажного и водонасыщенного
f,lgIst-dns		ИГЭ-6	Суглинок тяжелый пылеватый, прослоями до глины легкой, преимущественно тугопластичный, местами в нижней части слоя мягкопластичной консистенции, темно-серый, с частыми черными (углистыми) примазками, ненабухающий, сильнопучинистый, с прослойками песка разной крупности, плотного, влажного
f,lgIst-dns		ИГЭ-7	Супесь песчанистая, пластичная, прослоями до текучей, желтовато-коричневая, с прослоями толщиной до 1.5–2 см песка пылеватого, плотного, водонасыщенного и суглинка легкого, песчанистого, мягкопластичного
f,lgIst-dns		ИГЭ-8	Песок средней крупности, местами мелкий, плотный, прослоями средней плотности, водонасыщенный, серый, с тонкими прослойками и комьями глины черной слюистой, мягкопластичной, с включениями дресвы и гравия (до 20%)
f,lgIst-dns		ИГЭ-9	Дресвяно-щебнистый грунт, плотный, водонасыщенный, коричнево-серый, с заполнителем из песка разной крупности, реже с супесчано-суглинистым заполнителем
K,lg		ИГЭ-10	Песок пылеватый, прослоями мелкий, плотный, водонасыщенный, темно-серый с зеленоватым оттенком, ритмично чередующийся с прослоями мощностью 0.4–1.5 м суглинков легких песчанистых, преимущественно тугопластичных, местами с железистыми конкрециями, и супесей песчанистых, пластичных, реже твердых, с размытыми нечеткими границами перехода, с отдельными прослоями мощностью 0.05–0.4 м песчаника плотного, крепкого, на фосфатно-сидеритовом цементе
			Пьезометрический уровень напорных вод, его абсолютная отметка и дата замера
			Абсолютная отметка (числитель) уровня установления подземных вод и дата замера (знаменатель)
		Высота напора	
		Общегородской дренажный колодец	

Рис. 1. Окончание

ния грунтов восходящим потоком подземных вод. В чем же заключается эта уникальность? В естественных условиях такие явления встречаются нечасто и далеко не везде, но достаточно хорошо изучены в разных странах мира [13]. Их техногенные аналоги в основном характерны для объектов гидротехнического строительства [12]. Ни то, ни другое не имеет отношения к рассматриваемому объекту. Вместе с тем примыкающие к бетонным сооружениям грунты основания объектов промышленного и гражданского строительства тоже могут разрушаться потоком подземных вод и выноситься им на земную поверхность [7]. Это напрямую касается данного объекта, однако здесь суффозионное разрушение грунтов происходит не только в зонах их контакта с бе-

тонными конструктивными элементами жилого здания, а частицы грунта выносятся в искусственно созданное подземное пустотное пространство (дренаж).

Следует отметить, что строительство рассматриваемого сооружения было заморожено в 2011 г. при возведении надземной части до 15-го этажа. Работы по возобновлению строительства были начаты во второй половине 2021 г. с откачки из подземной части здания воды, уровень которой находился на отметке 170.0 м, т.е. на 0.35 м выше пола второго подземного этажа. В настоящее время уровень подземных вод в пределах контура здания поддерживается на отметках 162.7–161.7 м, хотя в водозаборном зумпфе он понижается до отметки 159.7 м.

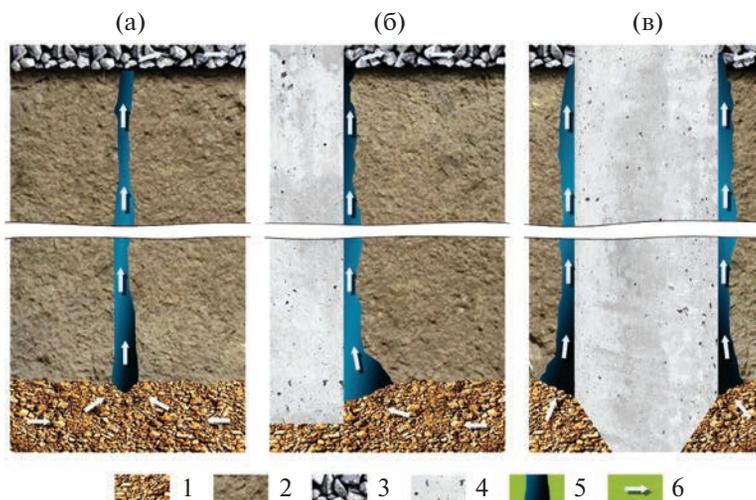


Рис. 2. Схемы, иллюстрирующие условия развития суффозионных процессов (фильтрационного разрушения и подземной эрозии) в основании строящегося здания при наличии: а – плохо затампонирующей разведочной скважины; б – неплотного примыкания грунта к “стене в грунте”, в местах ее погружения ниже подошвы водоупора; в – неплотного примыкания грунта к боковым поверхностям забивных свай. 1 – дровяно-щебенистый грунт; 2 – суглинок (водоупор); 3 – материал пластового дренажа; 4 – бетон; 5 – сквозное нарушение сплошности водоупора, заполненное водой; 6 – направление потока подземных вод и транзита грунтовых частиц (в поровом пространстве пластового дренажа поток направлен в сторону водозаборного зумпфа).

Выполненные конструктивные особенности подземной части недостроенного сооружения (“стена в грунте”, единая система вертикального и пластового дренажей, свайно-плитный и плитный фундаменты и др.) основаны на выявленном изыскателями геологическом строении грунтовой толщи участка и гидрогеологических параметрах первого от поверхности водоносного горизонта подземных вод. В частности, наличие под фундаментной плитой пластового дренажа свидетельствует о том, что поступление в котлован больших объемов воды из глубокого напорного водоносного горизонта началось сразу после начала производства земляных работ по открытию котлована. Первоначально проектом пластовый дренаж не предусматривался. Таким образом, можно утверждать, что при существующем геологическом строении толщи грунтов основания рассматриваемого объекта поступление напорных вод из второго от поверхности водоносного горизонта в котлован могло осуществляться:

- из недостаточно, а возможно вообще не затампонируемых геологических разведочных скважин (рис. 2а), расположенных в пределах площади здания;

- по контакту “стена в грунте” – грунт, в местах проникновения низа “стены в грунте” ниже подошвы водонепроницаемых моренных суглинков (рис. 2б);

- после сооружения свайных фундаментов бурозабивным методом, когда концы свай вошли в

толщу водовмещающих грунтов, вода дополнительно стала поступать в дренажную систему по образовавшимся приконтактным присвайным полостям (рис. 2в).

Динамика изменения во времени гидрологических условий на участке строительства на различных его этапах показана на схематических разрезах, приведенных на рис. 3.

Сформировавшийся в пределах участка гидрогеологический режим свидетельствует, что осуществляющаяся откачка воды из оборудованного зумпфа в пределах подземной части строящегося здания из пластового дренажа понижает уровень воды не первого от поверхности водоносного горизонта подземных вод, попадающих в пластовый дренаж через “стену в грунте”, а второго основного надюрского межпластового напорного водоносного горизонта. Очевидно, что при существующем геологическом строении грунтовой толщи поступление больших объемов напорных межпластовых вод в пластовый дренаж возможно только в результате нарушения сплошности толщи моренных суглинков, являющихся непосредственными грунтами основания и верхним водоупором межпластовых вод. Такие нарушения сплошности моренных суглинков, как показано на рис. 1, 3 и 4, могли произойти только в процессе производства строительных работ нулевого цикла (сооружения “стены в грунте”, свайного фундамента, некачественного тампонажа пробуренных ранее разведочных скважин).

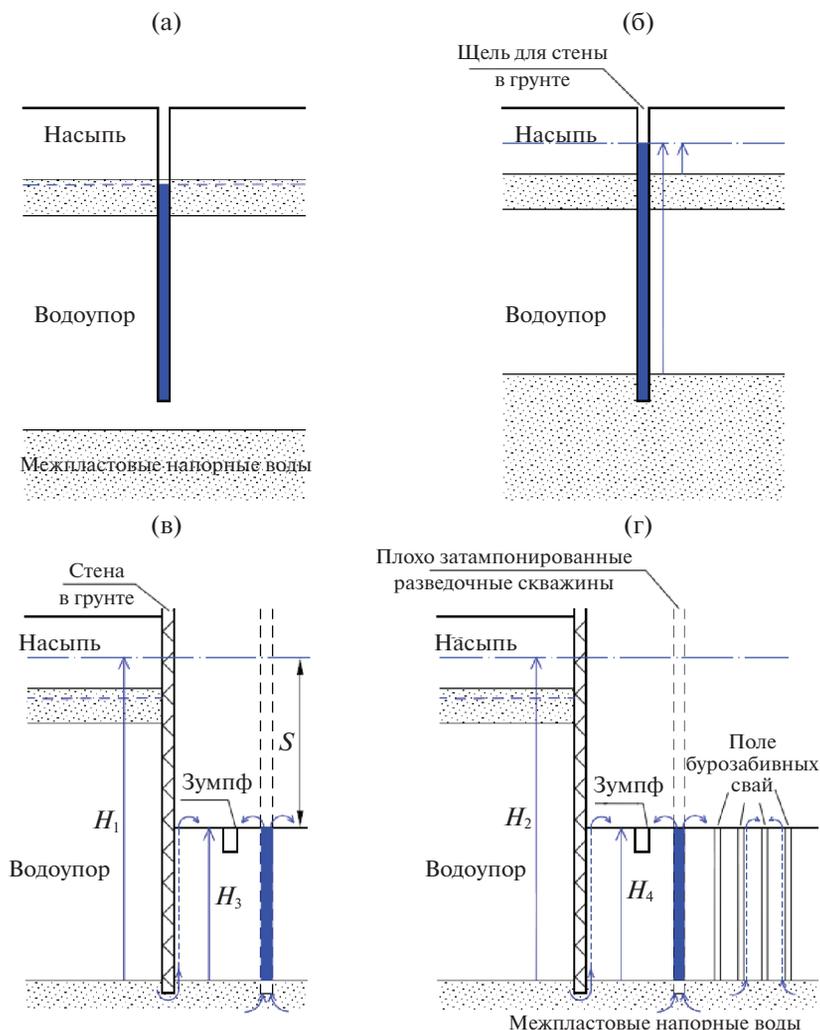


Рис. 3. Схематическое отражение изменения гидрогеологических условий на участке в процессе строительства подземной части объекта: а – не достиг подошвы водоупора; б – вскрывает кровлю напорного водоносного горизонта; в – в период разработки котлована; г – после сооружения свайного поля под высотными корпусами здания. H_1 и H_2 – высота напора подземных вод, за пределами “стены в грунте” при работающем насосе в зумпфе; H_3 и H_4 – высота напора подземных вод на момент включения и выключения насоса в зумпфе; S – величина водопонижения.

О поступлении напорных вод в пластовый дренаж свидетельствуют:

- значительный объем откачиваемой из дренажной системы воды – не менее 218 м³ за 16 ч работы насоса производительностью 34 м³/ч. Такое количество воды в три раза превышает возможный водоприток в котлован из первого от поверхности водоносного горизонта (72.0 м³/сут), даже если бы отсутствовала “стена в грунте”;

- более низкие значения абсолютных отметок пьезометрических уровней напорных вод в скважинах за пределами “стены в грунте” в настоящее время при постоянных откачках из дренажа, чем они были в 2004 г. при производстве первых изысканий на площадке. Так скважина № 6 имела отметку уровня 170.4 м (2004 г.), а в настоящее

время – 165.0 м (2022 г.); скважина № 6а соответственно 169.5 м (2004 г.) и 167.8 м (2022 г.). Как показано на рис. 1, в первом случае разность уровней составляет 5.4 м, а во втором – 1.7 м;

- значительная разница абсолютных отметок пьезометрических уровней воды (до 2.8 м) в скважинах, расположенных за пределами “стены в грунте”, в то время как в 2004 г. она не превышала 0.5 м. При этом в настоящее время минимальные значения высоты напора отмечаются в скважинах вне контура здания, которые расположены вблизи зумпфа.

Таким образом, сформировавшиеся в процессе строительства инженерно-геологические условия, обусловленные конструктивными особенностями подземной части сооружения и систематическим

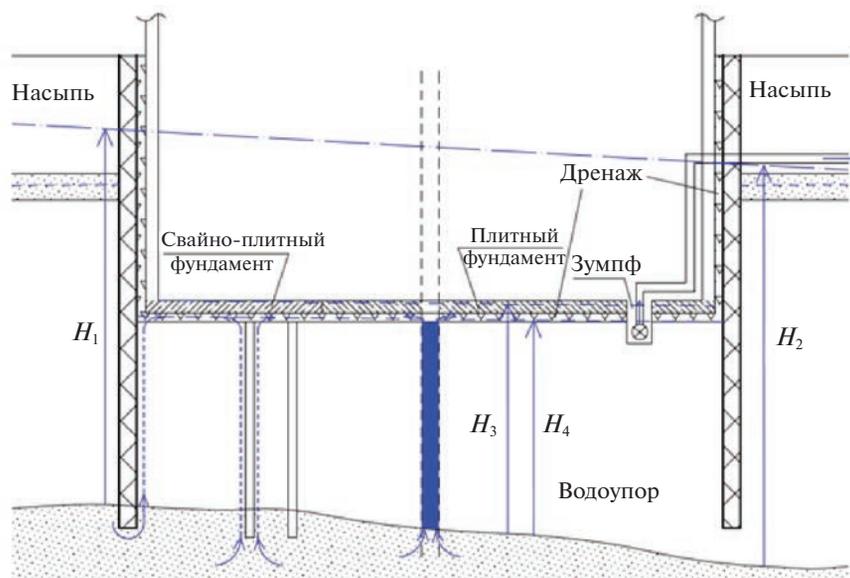


Рис. 4. Существующие гидрогеологические условия на участке строительства после сооружения пластового дренажа, фундаментной плиты и зумпфа, откачивающего воду из дренажной системы. H_1 и H_2 – высота напора подземных вод, за пределами “стены в грунте” при работающем насосе в зумпфе; H_3 и H_4 – высота напора подземных вод на момент включения и выключения насоса в зумпфе.

водопонижением в пределах контура здания, вызваны в первую очередь нарушением сплошности толщи верхнего водоупора межпластовых напорных вод и указывают на безусловное развитие здесь вертикальной суффозии водовмещающих неоднородных песчаных и дресвяно-щебнистых грунтов основания.

Однако процесс вертикальной суффозии протекает не только в несвязных грунтах основания, но, как было выявлено в процессе проведения инженерно-геологических изысканий, еще и в моренных суглинках, являющихся верхним водоупором напорных вод, и вызван он интенсивным размыванием вертикальных стенок скважностей¹, сформировавшихся в местах достижения подземными конструкциями кровли водоносного горизонта [4, 5, 7, 8]. Согласно определению В.П. Хоменко [9], такой тип суффозии можно отнести к восходящей суффозии “вулканического” характера или к “псевдовулканической суффозии”.

Размывание стенок скважностей вертикальным водным потоком

Процесс интенсивного размывания стенок скважностей, образовавшихся в верхней водоупор-

¹ Под скважностью здесь авторами понимается объем всех макропустот в связном грунте, обусловленный их трещиноватостью или различными видами пустотности (полостей), сформировавшихся в грунтовой толще в процессе изыскательских или строительных работ (плохой тампонаж или его отсутствие в буровых скважинах, присвайные трещины и пустоты вокруг бурозабивных свай и др.).

ной толще моренных суглинков был установлен при производстве буровых и зондировочных работ, осуществляемых с поверхности фундаментной плиты (рис. 5). В ряде намеченных скважин (в трех из шести) испытание грунтов статическим зондированием было проведено до производства буровых работ. Во всех трех точках при достижении кровли гравийно-галечниковых грунтов на глубинах 9.5–12.0 м от условного нуля был получен отказ в проникновении зонда диаметром 38 мм при нагрузке 10 т. Через три дня в местах проведения испытаний глинистых грунтов методом статического зондирования было осуществлено бурение скважин диаметром 108 мм. И во всех этих скважинах до глубин 9.5–12.0 м имел место провал бурового снаряда, что свидетельствовало о расширении полостей диаметром 38 мм до размеров, превышающих 108 мм.

Были предприняты попытки натурного измерения размеров размывостей с использованием видеокамеры с горизонтальной масштабной линейкой в двух скважинах (вода в третьей скважине из-за малого срока (1.5 сут), прошедшего после бурения, оказалась сильно замутненной с нулевой видимостью). Поперечные размеры скважностей измерялись каверномером на глубинах 3.0; 4.0 и 8.5 м, от поверхности фундаментной плиты. Кроме того, по окончании замеров осуществлялась непрерывная засыпка вертикальных скважностей песчаным грунтом средней крупности до полного их заполнения. Фиксировался объем засыпанного песка в скважину. Зная мощность моренных суглинков (от подошвы водоупора до по-



Рис. 5. Формирующийся конус выноса из пылеватых и глинистых частиц вокруг скважины, расположенной на поверхности фундаментной плиты, псевдо-вулканической суффозией на исследуемом объекте.

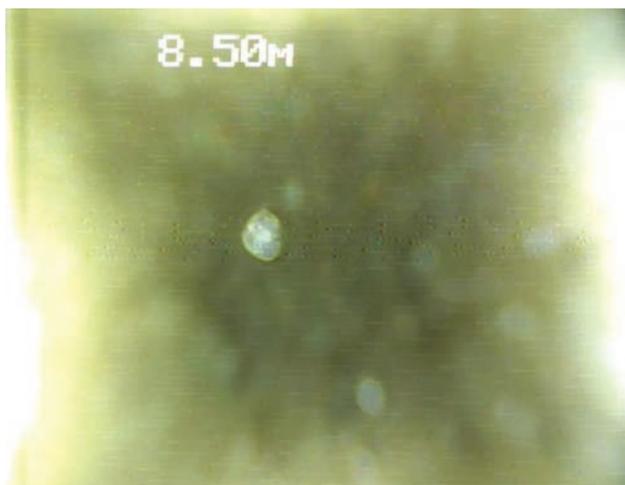


Рис. 6. Плавающая гравийная частица в открытой скважине на высоте 1.3 м выше кровли напорного водоносного горизонта.

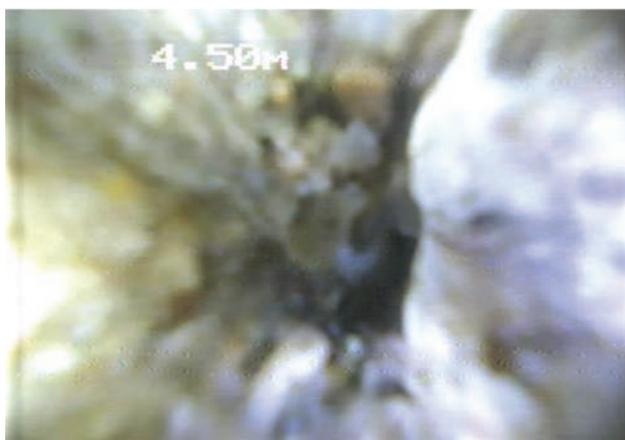


Рис. 7. Щебнистая пробка в открытой скважине в месте вывала крупной щебенки (валуна).

дошвы пластового дренажа) в каждой скважине по данным статического зондирования и объем песчаного заполнителя, рассчитывался средний диаметр скважины на момент ее засыпки.

Измерения каверномером показали, что через 5 сут после зондирования диаметр скважностей на глубине 3.0 м (на 1.5 м ниже проектной отметки дна котлована) составил ≈ 140 мм, а на глубине 8.5 м – не менее 310 мм. Следует отметить, что форма скважностей в сечении довольно изометричная (рис. 6, 7). Результаты замеров позволили оценить интенсивность размыва суглинистых стенок сквозных вертикальных полостей, которая на глубинах 3.0 и 8.5 м составила за 5 сут от 0.042 до 0.11 см/ч соответственно.

О вертикальной скорости потока воды в одной из скважностей диаметром около 310 мм на глубине 8.5 м можно судить по фотоснимку, приведенному на рис. 6, когда гравийная частица размером в поперечнике около 1 см находится во взвешенном состоянии (плавает) на высоте 1.3 м выше подошвы моренных суглинков. Основываясь на законах гидродинамики и используя уравнение Бернулли, можно рассчитать, что скорость потока здесь составляет 2.0 м/с, при этом гидродинамический напор достигает величины 1.2 кг/см².

Таким образом, размывание суглинистых стенок сквозных вертикальных скважностей, образовавшихся в процессе строительства подземных конструкций и после зондирования в толще водонепроницаемых моренных суглинков, может быть дополнительным фактором суффозионного привноса дисперсных (песчаных, пылеватых и глинистых) частиц в толщу пластового дренажа, что неминуемо приведет к очень скорой его кольматации. С другой стороны, развитие таких процессов ведет к формированию большого количества пустот в глинистой толще, к разуплотнению грунтов основания и значительному снижению их несущей способности, особенно при свайно-плитном фундаменте, а в отдельных случаях даже может привести к провальным явлениям под фундаментной плитой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наличие подземных вод непосредственно под плитными фундаментами глубокого заложения (плитой) внутри “стены в грунте”, приводящее к нарушению проектных отметок и всплытию сооружения, связано исключительно с геологическим строением и инженерно-геологическими условиями территории строительства. Наиболее типичными являются условия, когда подземные (грунтовые или межпластовые напорные) воды находятся в сжимаемой толще грунтов основания, а их уровни, включая пьезометрический, находятся вблизи поверхности земли.

Глубокое заложение фундаментов в сочетании с систематическим водопонижением внутри “стены в грунте” и конструктивными особенностями фундаментов и сопутствующих им дренажных систем способствуют развитию суффозионного процесса в водовмещающих несвязных грунтах как внутри “стены в грунте”, так и снаружи.

В рассмотренном авторами случае, при нарушении сплошности водонепроницаемой толщи и возникновении вертикальных потоков напорных вод, имеет место не только интенсивное развитие восходящей суффозии “вулканического” характера (“псевдовулканической суффозии”) в водовмещающих несвязных грунтах, которая приводит к их разуплотнению и снижению их несущей способности, но и образование крупных полостей в толще глинистых грунтов основания за счет размывания стенок скважностей, возникших в процессе строительства фундаментов или производства инженерно-геологических изысканий, способных привести к провальным явлениям в грунтах непосредственного основания сооружения.

В подобных случаях процесс размывания стенок скважностей в глинистых грунтах осуществляется не только за счет высоких скоростей (силы) восходящего водного потока, но и за счет шлифования и истирания (корразии) стенок твердыми песчаными частицами, переносимыми потоком.

Возникновение на объекте установленных в процессе изысканий инженерно-геологических условий свидетельствует о профессиональной безграмотности конструкторов и проектировщиков (полном отсутствии знаний основ дисциплины “инженерная геология”), допустивших в проектных решениях в несложных (согласно СП47.13330.2016, приложение Г) гидрогеологических условиях возможность вскрытия строительными конструкциями кровли водоносного горизонта при строительстве подземной части сооружения.

При производстве инженерно-геологических изысканий в сходных с описанными выше условиями особое внимание изыскатели должны обращать на гидрогеологические особенности участка. Основные гидрогеологические параметры встреченных водоносных горизонтов и вмещающих их грунтов следует определять только методом кустовых откачек.

Важнейшим условием производства инженерно-геологических изысканий при выявлении в грунтах основания высоконапорных межпластовых водоносных горизонтов должно являться обязательное тампонирование разведочных скважин высокомарочным бетонным раствором в интервале глубин залегания подошвы верхнего водоупора и, как минимум, проектной отметкой

дна котлована, сразу после окончания бурения скважины.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Аникеев А.А.* Методика оценки карстово-суффозионной опасности и риска в Москве. М: LAP LAMBERT Academic Publishing RU, 2017. 80 с.
2. *Анисимов В.В., Тер-Мартirosян З.Г.* Влияние механической суффозии на дополнительные осадки оснований фундаментов // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2009. № 4. С. 4–8.
3. Инженерная геология России. Т. 2. Инженерная геодинамика территории России. / Под ред. В.Т. Трофимова и Э.В. Калинина. М: Издательский дом “КДУ”, 2013. 816 с.
4. *Кашперюк П.И., Лаврусевич А.А., Никитина К.В., Крашенинников В.С.* Проектные решения в современном фундаментостроении: функция прогноза работы системы “основание-фундамент” // Промышленное и гражданское строительство. 2018. № 12. С. 49–54.
5. *Кашперюк П.И., Никитина К.В.* К вопросу о карстово-суффозионных проявлениях в карстующихся толщах города Москвы // Опасные для строительства геологические процессы: матер. Междунар. семинара, посв. 70-летию д. г.-м.н., профессора В.П. Хоменко. 2019. С. 40–42.
6. *Кочев А.Д., Чертков Л.Г., Зайонц И.Л.* К вопросу геологического районирования территории северо-запада Москвы по степени опасности развития карстово-суффозионных процессов // Инженерно-геологические задачи современности и методы их решения: матер. научно-практ. конференции. М.: Геомаркетинг, 2017. С. 24–40.
7. *Лаврусевич И.А., Хоменко В.П., Лаврусевич А.А.* Недооценка суффозионной опасности при строительстве плоскостных бетонных сооружений // Промышленное и гражданское строительство. 2015. № 11. С. 21–24.
8. Основные экзогенные процессы / [В.И. Осипов, В.М. Кутепов, В.П. Зверев и др.]. Под ред. В.И. Осипова. М.: ГЕОС, 1999. 271 с.
9. *Хоменко В.П.* Закономерности и прогноз суффозионных процессов. М.: ГЕОС, 2003. 216 с.
10. *Хоменко В.П.* Карстовое провалообразование: механизм и оценка опасности // Экологическая безопасность и строительство в карстовых районах: матер. междунар. симп. / Под ред. В.Н. Катаева и др. Пермь: ПГИУ, 2015. С. 50–60.
11. *Щербаков С.В.* Прогнозирование устойчивости сооружений в зависимости от суффозионности грунтов // Трофимуковские чтения. Новосибирск: Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, 2013. С. 584–586.
12. *Erosion of Geomaterials.* S. Bonelli (ed.). N.Y., ISTE/Wiley, 2012. 371 p.
13. *Kälin M.* Hydraulic piping – theoretical and experimental findings // Canadian Geotechnical Journal. 1977. V. 14. № 1. P. 107–124.

DEWATERING AS A LEADING FACTOR IN THE DEVELOPMENT OF SUFFUSION UPON THE CONSTRUCTION OF DEEP FOUNDATIONS

P. I. Kashperyuk^{a,#}, D. S. Moskaley^{b,##}, and V. P. Khomenko^{a,###}

^a*Moscow State Civil Engineering University,
Yaroslavskoe shosse, 26, Moscow, 129337 Russia*

^b*“Special survey for high-rise construction” Research and Production LLC,
ul. Akhitekтора Vlasova, 45A, Moscow, 117393 Russia*

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

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

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

The article considers the main technogenic factors leading to the development of mechanical suffusion during the construction and operation of buildings and structures with deep foundations. At a specific object, the dynamics of the development of an ascending suffusion process of a “volcanic” nature (“pseudovolcanic suffusion”) caused by systematic water drawdown and discontinuity of the upper aquiclude during construction work was studied. It is proved that the need for constant pumping groundwater entering the drainage system results rather from the violation of the upper aquiclude continuity, serving the soil foundation upon the construction of “retaining wall” and pile foundation than from the engineering defects in the constructed impervious screen. The research results made it possible for the first time to evaluate the possibilities of using two methods for determining the development of the ascending suffusion process in time; the method of measuring the duty cycles with a caliper and the method of filling the duty cycles with medium-sized sand until the formed volume is completely filled. Based on the laws of hydrodynamics, an attempt was made to determine the speed of the upward flow and the magnitude of the hydrophysical head. It is noted that the most important condition for the production of engineering surveys, when identifying interstratal high-pressure aquifers in the soils of the base, should be the mandatory plugging of exploration wells with high-quality concrete mortar in the range of depths of the bottom of the upper aquiclude and, at least, the design mark of the bottom of the pit, immediately after the completion of drilling.

Keywords: *mechanical suffusion, pseudovolcanic suffusion, cohesive and non-cohesive soils, head gradient, filtration flow velocity, erosiveness of cohesive soils, water drawdown, vertical impervious screen*

REFERENCES

1. Anikeev, A.A. *Metodika otsenki karstovo-suffuzionnoi opasnosti i riska v Moskve* [Methodology for assessing karst-suffusion hazard and risk in Moscow]. Moscow, Lambert Academic Publishing, 2017, 80 p. (in Russian)
2. Anisimov, V.V., Ter-Martirosyan, Z.G. *Vliyanie mekhanicheskoi suffozii na dopolnitel'nye osadki osnovanii fundamentov* [Influence of mechanical suffusion on additional settlements of foundation foundations]. *Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov*, 2009, no. 4, p. 4–8. (in Russian)
3. *Inzhenernaya geologiya Rossii. T.2. Inzhenernaya geodinamika territorii Rossii* [Engineering geology of Russia. Vol. 2. Engineering geodynamics of the territory of Russia]. V.T. Trofimov, E.V. Kalinin, Eds. Moscow, “KDU” Publ. house. 2013, 816 p. (in Russian)
4. Kashperyuk, P.I., Lavrusevich, A.A., Nikitina, K.V., Krasheninnikov, V.S. *Proektnye resheniya v sovremenном fundamntostroenii: funktsiya prognoza raboty sistemy “osnovanie-fundament”* [Design solutions in modern foundation engineering – the function of forecasting the “soil-foundation” system operation]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*, 2018, no. 12, pp. 49–54. (in Russian)
5. Kashperyuk, P.I., Nikitina, K.V. *K voprosy o karstovo-suffuzionnykh proyavleniyakh v karstuyushchikh sya tolshchakh g. Moskvy* [About karst-suffusion manifestations in the karstified strata of Moscow]. In: *Opasnye dlya stroitelstva geologicheskie protsessy. Mater. mezhd. seminar, posv. 70-letiyu prof. V.P. Khomenko* [Hazardous for construction geological processes: Proc. Intern. Workshop devoted to 70th anniversary of Prof. V.P. Khomenko]. 2019, pp. 40–42. (in Russian)
6. Kochev, A.D., Chertkov, L.G., Zayonts, I.L. *K voprosy geologicheskogo raionirovaniya territorii severo-zapada Moskvy po stepeni opasnosti razvitiya karstovo-suffuzionnykh protsessov* [About geological zoning of the territory in the north-west of Moscow according to the hazard of karst-suffusion development]. Proc. Sci.-Pract. Conference “Present-day engineering-geological problems and methods of their solution”. Moscow, Geomarket-ing Publ., 2017, pp. 24–40. (in Russian)
7. Lavrusevich, I.A., Khomenko, V.P., Lavrusevich, A.A. *Nedootsenka suffuzionnoi opasnosti pri stroitel'stve ploskostnykh betonnykh sooruzhenii* [Underestimating the suffusion hazard upon constructing planar concrete structures]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*, 2015, no. 11, pp. 21–24. (in Russian)

8. *Opasnye ekzogennye protsessy* [Hazardous exogenous processes]. V.I. Osipov, V.M. Kutepov, V.P. Zverev, et al. Moscow, GEOS Publ., 1999, 271 p. (in Russian)
9. Khomenko, V.P. *Zakonomernosti i prognoz suffuzionnykh protsessov* [Patterns and forecast of suffusion processes]. Moscow, GEOS Publ., 2003, 216 p. (in Russian)
10. Khomenko, V.P. *Karstovoe provalooobrazovanie: mekhanizm i otsenka opasnosti* [Karst sinkhole formation: mechanism and risk assessment]. Proc. Intern. Symposium "Environmental safety and construction in karst areas". Kataev V.N. et al., Eds., Perm, PGU Publ., 2015, p. 50–60. (in Russian)
11. Shcherbakov, S.V. *Prognozirovanie ustoichivosti sooruzhenii v zavisimosti ot suffuzionnosti gruntov* [Forecasting the stability of structures depending on soil suffusion]. Trofimuk Readings, Novosibirsk, Institute of Petroleum Geology and Geophysics SO RAN, 2013, pp. 584–586. (in Russian)
12. Erosion of geomaterials. S. Bonelli, Ed., New York, ISTE/Wiley Publ., 2012, 371 p.
13. Kälin, M. Hydraulic piping – theoretical and experimental findings. *Canadian Geotechnical Journal*, 1977, vol. 14, no 1, pp. 107–124.

ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ ПРИРОДНЫХ И ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 624.139.2

ДЕФОРМАЦИИ ЗДАНИЙ НА ЗАСОЛЕННЫХ МЕРЗЛЫХ ГРУНТАХ В ПОСЕЛКЕ АМДЕРМА ВСЛЕДСТВИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ

© 2023 г. Ю. В. Черняк^{1,*}, С. В. Бадина^{2,3,**}, А. В. Брушков^{1,***}

¹МГУ имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геокриологии,
Ленинские горы, 1, Москва, 119991 Россия

²МГУ имени М.В. Ломоносова, географический факультет, НИЛ геоэкологии Севера,
Ленинские горы, 1, Москва, 119991 Россия

³РЭУ им. Г.В. Плеханова, научная лаборатория региональной политики и региональных инвестиционных процессов,
Стремянный пер., 36, Москва, 117997 Россия

*E-mail: yuchernyak@mail.ru

**E-mail: bad412@yandex.ru

***E-mail: brouchkov@geol.msu.ru

Поступила в редакцию 10.02.2023 г.

После доработки 24.04.2023 г.

Принята к публикации 22.05.2023 г.

В настоящее время комплексного геотехнического мониторинга свайных фундаментов жилых и производственных объектов в регионах криолитозоны России не существует, и, соответственно, нет достоверной информации о том, какая их доля ежегодно подвергается деформациям, вызванным изменениями геокриологических условий. В данном исследовании представлены результаты полевых работ по обследованию зданий пос. Амдерма, расположенного в Заполярном районе Ненецкого автономного округа – на северо-востоке Европейской части России, в пределах Арктической зоны Российской Федерации. В статье приводятся основные причины деформаций зданий в поселке. Собраны данные по климатическим и мерзлотным условиям и их динамике, особенностям строительства и текущему состоянию инженерных сооружений в Амдерме. На основании исследований инженерных сооружений дается общая характеристика зданий поселка. Установлено, что на данный момент деформировано 59% от общего количества зданий, из них 80% деревянных, 46% кирпичных и бетонных и 31% зданий из легких конструкций; не деформировано лишь 40% тепловыделяющих объектов. Выделены основные причины деформаций оснований: засоленность грунтов, утечки воды в подполье или перераспределение поверхностного стока рядом со зданием, термокарст на территории застройки, крип, повышение температуры в результате климатических изменений и ползучесть грунтов основания сооружения. Результаты исследования позволили заполнить информационные “пробелы” в изучении арктического побережья Ненецкого автономного округа в работах, посвященных проблеме деформации зданий и сооружений. Полученные новые результаты могут быть интегрированы с другими аналогичными исследованиями.

Ключевые слова: многолетняя мерзлота, геокриологические риски, засоленные мерзлые грунты, изменение климата, Арктическая зона Российской Федерации

DOI: 10.31857/S0869780923040021, **EDN:** PPANCF

ВВЕДЕНИЕ

Проблема прогнозирования социально-экономических последствий активации геокриологических опасностей, возникающих под влиянием климатических изменений, является важным и актуальным направлением научного поиска. Жизнь и экономическая активность людей в условиях криолитозоны связаны со множеством дополнительных издержек, среди которых особенно стоит выделить необходимость применения специфических способов строительства на многолетнемерзлых грунтах. Изменение опти-

мального диапазона температур грунтов, изначально заложенного при проектировании тех или иных сооружений (инженерных объектов), неизбежно приводит к катастрофическим последствиям – деформациям и их выводу из эксплуатации соответственно.

К сожалению, на сегодняшний день не существует всеобъемлющего комплексного геотехнического мониторинга свайных фундаментов жилых и производственных объектов в регионах криолитозоны России и, соответственно, нет достоверной информации о том, какая их доля еже-

годно подвергается деформациям, обусловленных именно изменениями геокриологических условий. Наличие базы конкретных эмпирических данных по уже деформированным объектам позволило бы осуществлять верификацию прогнозов геокриологических рисков [16, 17, 20], а также служить основой для их уточнения. Мелкий масштаб вышеперечисленных прогнозов (уровень стран и регионов) не позволяет в полной мере учесть локальные особенности конкретных населенных пунктов, например, фактор засоленности грунта. В связи с этим в данном исследовании представлены результаты полевых работ по обследованию зданий пос. Амдерма.

Поселок Амдерма (69°45′22″с.ш.; 61°40′00″в.д.) расположен на побережье Карского моря, к востоку от пролива Югорский Шар на Югорском полуострове. Административно он включен в состав Заполярного района Ненецкого автономного округа и расположен в границах Арктической зоны Российской Федерации.

Поселок основан в 1933 г. в связи с началом строительства рудника по добыче флюорита. Со второй половины 50-х годов XX в. велось активное строительство зданий, развивался морской порт для доставки грузов в Заполярье, был построен аэропорт. Численность населения поселка превышала 10 тыс. человек¹. Ввиду сложности проектирования и строительства в суровых климатических условиях (сильные ветры и интенсивный снегоперенос, активные береговые процессы, развитие мерзлых пород с высоким засолением) в поселке была создана Амдерминская научно-исследовательская мерзлотная станция для решения задач изучения мерзлых грунтов и их температурного режима, а также мерзлотных процессов².

В настоящее время выгодное транспортно-географическое положение поселка на берегу Карского моря предоставляет перспективы его развития как базы для освоения нефтегазоносных месторождений северной части Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции. Например, в Стратегии развития морской портовой инфраструктуры России до 2030 г. Амдерма рассматривается как конечный пункт для железнодорожного транспорта (дорога Воркута-Амдерма) и место строительства современного порта с морским терминалом для приемки угля с месторождений

округа и Республики Коми. Перспективы инфраструктурного развития, несомненно, требуют детальной проработки проблемы трансформации мерзлотных условий на данной территории.

Начало исследований засоленных мерзлых грунтов как оснований зданий и сооружений относится к 1958 г. При анализе причин деформации зданий в пос. Амдерма Ю.Я. Велли обратил внимание на то, что даже при температуре $-3.0...-4.5^{\circ}\text{C}$ грунты оснований внешне мерзлые с наличием кристаллов льда легко “мялись” руками, т.е. находились в пластичномерзлом состоянии. При этом было учтено, что на территориях, подвергавшихся трансгрессии моря, не могло остаться его “следов”. Это легло в основу выдвинутой автором гипотезы, что одной из причин деформации зданий может быть наличие в многолетнемерзлых грунтах легкорастворимых солей. На мерзлотной станции в 1959 г. начали проводить разработку данной гипотезы и методики исследований, экспериментальные работы по изучению физико-механических свойств засоленных мерзлых грунтов и других аспектов взаимодействия этих грунтов с фундаментами [3]. Были отмечены повышенная сжимаемость засоленных мерзлых грунтов под нагрузкой, снижение величин эквивалентного сцепления и сопротивления сдвигу по боковым поверхностям фундамента.

В настоящее время существует ряд исследований, посвященных вопросам формирования засоления мерзлых грунтов и распределения засоленности в плане и по разрезу [1, 3, 14, 21], а также изучению физико-механических свойств таких грунтов и их взаимодействия с фундаментами [1, 13, 15, 19]. Однако сравнительно мало данных об особенностях деформаций инженерных сооружений, вызванных недоучетом засоленности грунта при проектировании и строительстве. В качестве примера таких работ можно привести статью [18], в которой рассматривается влияние фактора засоленности грунта на недопустимую осадку здания в г. Барроу (Аляска).

Таким образом, проведенный анализ литературы показал, что на настоящий момент существует небольшое количество локальных данных о деформации инженерных сооружений на засоленных мерзлых грунтах на Арктическом побережье. Многие аспекты, связанные с особенностями и типами деформаций сооружений, а также с причинами, их вызвавшими, неизвестны.

Цель исследования — выявление основных причин деформации зданий в пос. Амдерма.

Для достижения заявленной цели решались следующие задачи: сбор данных о климатических и мерзлотных условиях и их динамике для исследуемой территории, разработка методики исследования, общая характеристика зданий поселка и

¹ СП “Поселок Амдерма” ЗР НАО // Официальный сайт органов местного самоуправления Заполярного района Ненецкого автономного округа. [Электронный ресурс]. URL: <https://zrnao.ru/o-zapolyarnom-rajone/municipalnye-obrazovaniya/mo-%C2%ABposelok-amderma%C2%BB-nao.html> (дата обращения: 10.04.2023).

² Брушков А.В. Мерзлотные станции — уникальное российское преимущество. [Электронный ресурс]. URL: <https://goartic.ru/nauka-i-kultura/merzlotnye-stantsii-unikalnoe-rossijskoe-preimushchestvo/> (дата обращения: 10.04.2023).

выделение основных факторов деформаций их оснований.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Методика исследования деформаций зданий на засоленных мерзлых грунтах в Амдерме включала несколько этапов. Вначале был проведен обзор информационных источников современного состояния вопроса, касающегося особенностей строительства и текущего состояния инженерных сооружений на Арктическом побережье. Первоначальная информационная база исследования была сформирована на основе данных научных и научно-технических отчетов, в основном подготовленных специалистами Производственного и научно-исследовательского института по инженерным изысканиям в строительстве (ПНИИС) и хранящихся в архивах Амдерминской мерзлотной станции (АНИМС):

1. Комплексные инженерно-геологические исследования для строительства пристройки к школе в п. Амдерма / НПО "Стройизыскания". Амдерма, 1989.

2. Выбор трассы для прокладки кабеля трансляции сигналов ОРЛ-КДП / АНИМС. Амдерма, 1988.

3. Заключение по инженерно-геологическому обследованию площадки строительства КБО Амдерминской НГРЭ / ПНИИС. Амдерма, 1987.

4. Заключение по предварительному инженерно-геологическому обследованию территории БПО Синькин Нос АНГРЭ / ПНИИС). Амдерма, 1987.

5. Инженерно-геологическое обследование площадки строительства прачечной поселковой больницы пос. Амдермы / ПНИИС. Амдерма, 1986.

6. Провести исследования и разработать рекомендации по обеспечению устойчивости здания ДЭС/. НПО "Стройизыскания", ПНИИС. Амдерма, 1989.

Анализ перечисленных информационных источников, а также работ [1, 18] позволил рассмотреть основные причины деформаций зданий на изучаемой территории по данным предыдущих изысканий.

Следующий этап заключался в сборе данных по климатическим и мерзлотным условиям и их динамике для исследуемой территории. Климатические и мерзлотные условия приводятся на основе данных отчетов АНИМС. Одной из задач настоящей работы было установление связи между развитием деформаций оснований и изменением климата в регионе. Для этого был проанализирован массив данных среднегодовых температур воздуха за период наблюдения 1980–2020 гг. [2].

В ходе полевых исследований, проведенных в июне 2021 г., на основе визуальных обследований

изучались следующие характеристики инженерных сооружений пос. Амдерма:

- принцип строительства,
- тип и материал фундамента,
- особенности тепловыделения,
- наличие и характеристика деформаций,
- использование здания в настоящее время.

Осмотр состояния технических этажей, подполей зданий и расположенных в них коммуникаций выполнялся согласно [9].

Деформации оснований и фундаментов фиксировались в соответствии с [10]. В ходе обследований были получены следующие данные: величина осадок фундаментов; характер, место и величина раскрытия трещин на фундаментных конструкциях и стенах здания; физико-механические свойства основания на время проведения обследования; измерены относительные вертикальные и горизонтальные перемещения, а также крен фундамента.

На основе полученных данных составлена общая характеристика зданий пос. Амдерма и выделены основные причины деформаций их оснований.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Мерзлотные условия района исследования

Характеристика мерзлотных условий пос. Амдерма приведена на основе данных отчетов АНИМС. Климат исследуемого района арктической, морской. Среднегодовая температура воздуха составляет -7°C . Преобладают ветра южных румбов, среднегодовая скорость ветра 7.3 м/с. В зимнее время скорости ветра выше, чем летом. Годовая сумма осадков 450 мм, из них 200 мм выпадает в виде снега в холодное время года.

На открытой, ровной территории снежный покров составляет 0.2–0.5 м, однако ввиду сильного ветрового переноса на застроенной территории в отдельных местах мощность снега достигает 1.5 м и более. Согласно отчету ВСЕГИНГЕО о НИР по теме 445–86д "Изучить свойства мерзлых пород и разработать прогноз развития криогенных процессов Амдерминского района" (1989), на территории летного поля аэропорта Амдерма, расположенного на песчаной косе, сложенной морскими отложениями, наибольшие мощности снежного покрова (до 3 м и более) зафиксированы на защищенных от ветра участках, наименьшие (1.0–2.5 м) – на незащищенных от ветра северных склонах. Такое неравномерное распределение снежного покрова оказывает существенное влияние и на формирование температурного режима многолетнемерзлых пород.

Почвенно-растительный покров в естественных условиях представлен кустарничками, мха-

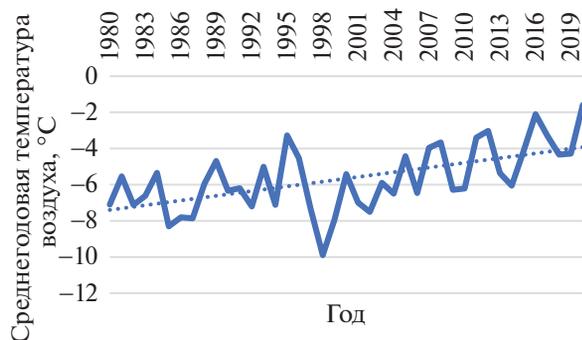


Рис. 1. Среднегодовая температура воздуха в пос. Амдерма [2].

ми, лишайниками, а на застроенных участках, как правило, нарушен.

Преимущественно с поверхности развиты засоленные четвертичные отложения морского происхождения, перекрывающие скальные допалеозойские метаморфизованные породы.

Геоморфологическое строение занимаемой поселком территории представлено ровной, слабонаклоненной в сторону моря поверхностью I и II аккумулятивных морских террас высотой соответственно 8–10 и 15–25 м позднеплейстоценового возраста, сложенных морскими и прибрежно-морскими отложениями преимущественно суглинистого состава, а также пляжем и песчаной косой. Согласно [6], территория поселка относится к приарктической области морских трансгрессий. Породы позднеплейстоценового возраста представлены ледниковыми отложениями, морскими и аллювиально-морскими отложениями морских террас, породы голоценового возраста – морскими осадками пляжей и лайд, аллювиально-морскими отложениями, а также элювием и делювием.



Рис. 2. Термоцирк в 5 км на юго-восток от пос. Амдерма (фото Ю.В. Черняк, 2021).

Поселок расположен в районе сплошного распространения многолетнемерзлых пород. Среднегодовые температуры пород $-3.5 - -4.5^{\circ}\text{C}$.

Широко распространены засоленные мерзлые грунты. Отметим, что в настоящей работе измерение засоленности и температурного режима грунтов оснований не проводилось, необходимые данные были получены на основе отчетов АНИМС. Засоленность грунтов: песков – 0.05–0.07%, супесей – 0.035–0.10%, суглинков – 0.10–0.90%. Как правило, засоленность грунтов плавно увеличивается с глубиной.

Важно отметить, что за период климатических наблюдений для исследуемой территории характерен рост среднегодовой температуры воздуха. На рис. 1 представлен график среднегодовой температуры воздуха за период наблюдения 1980–2020 гг. За данный период среднегодовая температура повысилась на 3°C . Следовательно, ответной реакцией мерзлых пород является повышение их среднегодовой температуры, что может привести к негативным изменениям свойств грунтов оснований инженерных сооружений при практически их повсеместной засоленности.

Примером динамики мерзлотных условий являются образование и развитие современных термоцирков [7, 11] (рис. 2).

Общая характеристика зданий

По состоянию на 1 октября 2021 г. численность постоянного населения пос. Амдерма составляет 451 человек (по данным Всероссийской переписи населения 2020 г.³). Ввиду сильного миграционного оттока населения, характерного для большинства арктических районов в постсоветский период, численность населения поселка сократилась более чем в 12 раз с 1990 г. и более чем в 22 раза с 1950-х годов. Значительная часть жилищного фонда находится в настоящее время в заброшенном состоянии. Действующий жилищный фонд в основном составляют одно-, двух- и трехэтажные деревянные и кирпичные многоквартирные дома, старейшие из которых были построены еще в 30-е гг. XX в., но основная доля была введена в эксплуатацию в 1960–1980-е гг. В 1980-е годы в Амдерме открылась новая страница в истории строительства: началось сооружение зданий со всеми удобствами из алюминиевых конструкций.

³ Итоги Всероссийской переписи населения 2020 года. Том 1. Численность и размещение населения. Таблица 5. Численность населения России [Электронный ресурс]. URL: https://view.officeapps.live.com/op/view.aspx?src=https%3A%2F%2Frosstat.gov.ru%2Fstorage%2Fmediabank%2Ftab-5_VPN-2020.xlsx&wdOrigin=BROWSELINK (дата обращения: 10.04.2023).



Рис. 3. Деревянное жилое здание (а) и жилое здание военных строителей (б) в поселке Амдерма (фото Ю.В. Черняк, 2021).

Согласно данным Фонда содействия реформированию жилищно-коммунального хозяйства, в поселке заселено 13 жилых домов общей площадью порядка 10 тыс. кв. м. В работе [12] их совокупная рыночная стоимость была оценена в 555 млн руб., что составляет лишь порядка 4% от общей рыночной стоимости жилищного фонда Ненецкого автономного округа в ценах 2020 г. При этом все доходы бюджета поселка в 2020 г. с учетом межбюджетных трансфертов составляли порядка 28 млн руб., что говорит о крайне низком потенциале внутренних финансовых возможностей замещения аварийного жилищного фонда вследствие последующих вероятных деформаций. Площадь сформированной территории жилой застройки в границах поселка составляет 3.6 га. Согласно действующему Генплану пос. Амдерма [8], объекты социальной инфраструктуры представлены школой, детским садом, фельдшерско-акушерским пунктом 1997 г. постройки, домом культуры и библиотекой, находящейся в аварийном состоянии, четырьмя объектами розничной торговли, баней на 15 мест, зданием поселковой администрации. Основным источником электрогенерации служит ветродизельная электростанция. Значительную часть территории занимают коммунально-складская застройка и ее развалины. Действующая схема территориального планирования Ненецкого автономного округа предполагает существенное расширение мощностей объектов социальной сферы и, соответственно, новое строительство.

В рамках проведенного полевого исследования в Амдерме было исследовано 220 зданий, из них по материалу строительства: камень — 98 объектов, дерево — 86, алюминий — 29; для 6 объектов материал не определен.

Преобладает свайный тип фундамента, фундаменты в виде плиты встречаются редко. Проектная высота подполья составляет в среднем 1.5 м; толщина ростверка — 0.5 м.

Большинство инженерных сооружений построено по I принципу (сохраняется мерзлое со-

стояние грунтов в процессе строительства и в течение всего периода эксплуатации). Исключение составляют 4 объекта (из них 3 — котельные), построенные по II принципу (перед строительством грунты предварительно оттаивают или используют грунты, оттаивающие в период эксплуатации). Определяющими критериями для выбора II принципа строительства являлись высокое выделение тепла при эксплуатации объекта и близкое к поверхности залегание скальных грунтов.

На основе собранных характеристик было установлено, что на данный момент деформировано 59% от общего количества зданий, из них 80% деревянных, 46% кирпичных и бетонных и 31% зданий из легких конструкций.

В качестве примера неравномерных деформаций и осадки более 1 м среди деревянных сооружений приведем фото одного из жилых зданий (в настоящее время не используется) (рис. 3а). Неравномерные деформации привели к обрушению центральной части деревянного здания (рис. 3б). Неравномерные деформации и осадки более 1 м также привели к частичному или полному разрушению каменных зданий (рис. 4а–в). Примером неравномерных деформаций более 0.5 м среди зданий из легких конструкций является детский сад (рис. 4г).

К тепловыделяющим объектам были отнесены котельные и бани (всего 20 объектов). Из них не деформировано только 8. Таким образом, большая часть тепловыделяющих сооружений испытывает недопустимые и неравномерные деформации, 3 котельные разрушены. В настоящее время используются 2 котельные. По II принципу были построены 3 здания, из них: военная котельная — не деформирована, в настоящее время не используется; котельная военных строителей — недопустимые деформации, осадка более 1.5 м, в настоящее время не используется (рис. 5а); центральная котельная — допустимые деформации, в настоящее время используется. Отмечается, что за последний год на центральной котельной образовались трещины, рядом с котельной на расстоянии



Рис. 4. Школа (а), дом офицеров (б), жилое 5-этажное здание (в) и детский сад “Арктик Строй” в пос. Амдерма (г) (фото Ю.В. Черняк, 2021).

примерно 1 м от здания наблюдается просадка грунта рис. 5б). Тип фундамента центральной котельной – плита, основание – скальные грунты.

В настоящее время в поселке используются 26 зданий (12% от общего числа исследуемых объектов).

Причины деформаций оснований

По данным предшествующих работ можно сделать вывод, что основными причинами деформаций фундаментов в пос. Амдерма могут являться неучет засоленности грунтов основания при проектных расчетах, а также их растепление в процессе эксплуатации.

На основании проведенных в 2021 г. исследований деформаций инженерных сооружений, микрорельефа территории, а также обводненно-

сти участков строительства, были выделены основные факторы деформаций оснований:

- засоленность грунтов,
- утечки воды в подполье или перераспределение поверхностного стока рядом со зданием (рис. 6),
- термокарст на территории застройки (рис. 5б, 7),
- крип,
- повышение температуры в результате климатических изменений или ползучесть грунтов основания.

На рис. 8 представлено сопоставление статистик наблюдаемых недопустимых деформаций с визуальными признаками нарушения условий теплообмена через поверхность в зависимости от принципа строительства. Инженерные сооруже-

(a)

(б)



Рис. 5. Котельная военных строителей (а) и центральная котельная (б) в поселке Амдерма (фото Ю.В. Черняк, 2021).



Рис. 6. Наличие воды (льда) в подполье каменного здания (фото Ю.В. Черняк, 2021).



Рис. 7. Развитие термокарста вблизи здания в поселке Амдерма (фото Ю.В. Черняк, 2021).

ния, для которых фактор деформации визуально не определяется, вероятно, испытывают деформации в результате неучета засоленности грунтов основания при проектировании и строительстве, повышения температуры в результате климатических изменений или ползучести грунтов основания.

Наличие засоленных мерзлых грунтов в основании подтверждается многочисленными архив-

ными данными измерений засоленности грунтов. По-видимому, этот фактор играет ключевую роль, поскольку данные породы распространены практически повсеместно на Арктическом побережье [1, 18]. Поскольку засоленные породы характеризуются повышенными значениями деформационных параметров и низкой несущей способностью, необходимо применение специ-



Рис. 8. Сопоставление статистик наблюдаемых недопустимых деформаций с визуальными признаками нарушения условий теплообмена через поверхность в зависимости от принципа строительства.

альных решений при проектировании и строительстве инженерных сооружений. Однако на практике данные требования не всегда выполняются.

Термокарст вблизи инженерного сооружения связан с наличием подземных льдов и/или льдистых грунтов. Увеличение глубины сезонного оттаивания в результате климатических или техногенных факторов приводит к протаиванию подземных льдов и льдистых грунтов и ведет к изменению рельефа территории строительства.

Утечки воды в подполье или перераспределение поверхностного стока рядом со зданием вызывают повышение температуры грунтов основания. При изменении температуры грунта, оказывающей влияние на строение и свойства гидратных пленок глинистых частиц, происходит изменение прочности дисперсного глинистого грунта [4, 5].

Принимая во внимание тот факт, что в основании сооружений залегают засоленные мерзлые грунты, то повышение их температуры даже в отрицательном диапазоне может стать причиной перехода мерзлых засоленных пород из твердомерзлого в пластичномерзлое состояние и изменения их физико-механических свойств. Кроме того, повышение среднегодовой температуры способствует понижению кровли залегания многолетнемерзлых пород и может привести к активизации процесса термокарста.

Крип также может являться причиной развития деформаций оснований сооружений, построенных на склоне.

Причиной медленных деформаций оснований может являться ползучесть грунтов, а также по-

степенное возрастание их среднегодовой температуры. На рис. 1 представлен тренд повышения среднегодовой температуры воздуха для пос. Амдерма, что в свою очередь ведет к повышению среднегодовой температуры грунтов и увеличению глубины сезонного оттаивания, а следовательно, изменению прочностных и деформационных свойств грунтов и активизации на участке застройки геокриологических процессов, связанных с потеплением климата. В настоящем исследовании не проводились измерения температур и их сопоставление с результатами измерений прошлых лет. Однако при долгосрочном периоде наблюдений следует принимать во внимание, что ползучесть грунтов основания может влиять на развитие деформации фундаментов сооружений.

На основе исследования деформаций оснований инженерных сооружений в пос. Амдерма можно сделать вывод, что наибольшее количество разрушений связано с недоучетом засоленности грунтов при проектировании и строительстве. Утечки воды в подполье или перераспределение поверхностного стока рядом со зданием и термокарст также являются частыми причинами деформаций.

Таким образом, из вышесказанного следует, что при строительстве на Арктическом побережье необходимо учитывать засоленность грунтов основания, а также не допускать образования обводненных участков в подпольях инженерных сооружений.

В результате проведенного полевого исследования было установлено, что в настоящий момент в Амдерме не деформировано лишь ~40% соору-

жений, а из 59% деформированных зданий поселка по материалу строительства: 80% – деревянные, 46% – кирпичные и бетонные, и 31% – из легких конструкций. Следовательно, здания из легких конструкций, а также кирпичные и бетонные здания являются наиболее приоритетными объектами для строительства в Арктическом регионе. Причем строительству и дальнейшей эксплуатации тепловыделяющих объектов следует уделять особое внимание.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе представлены результаты микрогеографического обследования: дана подробная характеристика мерзлотных условий застроенной территории прибрежного арктического пос. Амдерма. В результате исследования 220 зданий и сооружений установлено, что наиболее часто встречающейся причиной деформаций при строительстве и эксплуатации инженерных сооружений является недоучет засоленности грунтов основания, изменение температурного режима преимущественно из-за теплового влияния зданий или попадания поверхностных и сточных вод в основание, а также повышение температуры в результате климатических изменений. Следует отметить, что в некоторых случаях причиной деформаций может являться крип. Также одной из причин деформаций является ползучесть грунтов основания.

Проведенное исследование имеет значительную практическую значимость, поскольку его результаты позволили заполнить локальные информационные “пробелы” для арктического побережья Ненецкого автономного округа в круге работ, посвященных проблеме деформации зданий и сооружений. Полученные новые результаты могут быть интегрированы с другими аналогичными исследованиями, и таким образом со временем может быть получена детализированная база данных деформированных объектов и факторов их деформации, которая может служить для уточнения прогнозов экономических последствий геокриологических изменений, в том числе вследствие потепления климата.

Более узкое практическое применение может заключаться в использовании полученных результатов при градостроительном планировании Амдермы, поскольку существующий Генеральный план, предполагающий существенное новое строительство, не в полной мере учитывает специфические особенности локальных мерзлотных условий. Согласно документам стратегического планирования, дальнейшее инфраструктурное развитие Амдермы как опорного пункта Северного морского пути должно повлиять на повышение его миграционной привлекательности и, соответственно, численности населения. В Генеральном

плане развития поселка указано, что на всей его территории планируется “частичный снос ветхих и аварийных жилых домов и строительство на их месте частных жилых домов с приусадебными участками в северной и северо-западной частях населенного пункта, в восточной части населенного пункта предлагается строительство микрорайона индивидуальных и многоквартирных жилых домов <...> предусматривается восстановление части жилых домов после проведения их предварительного обследования текущего состояния, а также строительство новых зданий <...> с учетом сноса всего аварийного и ветхого жилья в течение расчетного срока и сохранения существующего жилого фонда в надлежащем состоянии предусмотрено строительство нового жилья общей площадью 22.6 тыс. кв. м. Таким образом, жилой фонд к концу расчетного срока должен составить не менее 31.5 тыс. кв. м”.

Учет факторов деформации, выявленных в ходе данного исследования, необходим при проектировании будущих зданий и сооружений.

Экономико-географическая часть исследования выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 21-77-00047 “Прогнозирование экономического ущерба для территории Российской Арктики в контексте изменения геокриологических условий”, <https://rscf.ru/project/21-77-00047>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Брушков А.В. Засоленные мерзлые породы Арктического побережья, их происхождение и свойства. М.: Изд-во МГУ, 1998.
2. Булыгина О.Н., Разуваев В.Н., Трофименко Л.Т., Швец Н.В. Описание массива данных среднемесячной температуры воздуха на станциях России. URL: <http://mete.ru/data/156-temperature>
3. Велли Ю.Я. Исследования засоленных вечномерзлых грунтов Арктического побережья (обзор) / Ред. С.С. Вялов. М.: Наука, 1990. С. 9–20.
4. Карпенко Ф.С., Кутергин В.Н., Фролов С.И., Собин Р.В. Влияние на прочность глинистых грунтов изменений свойств гидратных пленок при температурных воздействиях // Геоэкология. 2021. № 1. С. 69–78.
5. Карпенко Ф.С., Кутергин В.Н., Дернова Е.О., Осокин А.А. Методы исследования свойств мерзлых грунтов и прогноза их изменения // Геоэкология. 2022. № 2. С. 80–87.
6. Карта плиоцен-четвертичных образований: R-41 (Амдерма). Государственная геологическая карта Российской Федерации. Третье поколение. Карта плиоцен-четвертичных образований. Южно-Карская серия, масштаб: 1 : 1000000, серия: Южно-Карская, составлена: ОАО МАГЭ, ФГБУ “ВСЕГЕИ”, 2008 г., редактор(ы): Лопатин Б.Г.
7. Маслаков А.А., Кузякин Л.П., Комова Н.Н. Динамика развития термоцирка, вмещающего залежь пластового льда, вблизи села Лаврентия (Чукотский АО) за 2018–2021 гг. // Арктика и Антарктика. 2021.

- № 4. С. 32–46.
<https://doi.org/10.7256/2453-8922.2021.4.37225>
8. Проект (внесение изменений) генерального плана муниципального образования “поселок Амдерма” Ненецкого автономного округа. Пояснительная записка. Агентство по развитию территорий Geonika. Омск, 2017. 54 с.
<https://pandia.ru/text/81/533/67586.php>
 9. Рекомендации по наблюдению за состоянием грунтов оснований и фундаментов зданий и сооружений, возводимых на вечномёрзлых грунтах. НИИОСП. М.: Стройиздат, 1982.
<https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293793/4293793784.pdf>
 10. Руководство по наблюдениям за деформациями оснований и фундаментов зданий и сооружений. НИИОСП. М.: Стройиздат, 1975.
<https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293826/4293826952.pdf>
 11. Тумской В.Е., Торговкин Н.В., Романис Т.В. Термощирки Якутии // Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России. 2021. № 8. URL:
<https://cyberleninka.ru/article/n/termotsirki-yakutii>
 (дата обращения: 12.04.2023).
 12. Badina S.V. Estimation of the value of buildings and structures in the context of permafrost degradation: The case of the Russian Arctic // *Polar Science*. 2021. V. 29. Iss. 100730.
<https://doi.org/10.1016/j.polar.2021.100730>
 13. Biggar K., Sego D. The strength and deformation behaviour of model adfreeze and grouted piles in saline frozen soils // *Canadian Geotechnical Journal*. 2011. V. 30. P. 319–337.
<https://doi.org/10.1139/t93-027>
 14. Gilbert G.L., Instanes A., Sinitsyn A.O., Aalberg A. Characterization of two sites for geotechnical testing in permafrost: Longyearbyen, Svalbard [J] // *AIMS Geosciences*. 2019. V. 5 (4). P. 868–885.
<https://doi.org/10.3934/geosci.2019.4.868>
 15. Hivon E.G., Sego D. Strength of frozen saline soils // *Canadian Geotechnical Journal*. 1995. V. 32. P. 336–354.
<https://doi.org/10.1139/t95-034>
 16. Hjort J., Karjalainen O., Aalto J. et al. Degrading permafrost puts Arctic infrastructure at risk by midcentury // *Nature communications*. 2018. V. 9 (1). Iss. 5147.
 17. Melnikov V.P., Osipov V.I., Brouchkov A.V. et al. Climate warming and permafrost thaw in the Russian Arctic: potential economic impacts on public infrastructure by 2050 // *Natural Hazards*. 2022. V. 112. P. 231–251.
 18. Miller D.L., Johnson L.A. Pile settlement in saline permafrost: a case history. // *Proceedings, 5th Canadian Permafrost Conference*. Quebec, Que., 1990. P. 371–378.
 19. Sinitsyn A., Løset S. Strength of frozen saline silt under triaxial compression with high strain rate // *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2011. V. 48.
<https://doi.org/10.1007/s11204-011-9148-2>
 20. Streletskiy D.A., Suter L., Shiklomanov N.I. et al. Assessment of climate change impacts on buildings, structures and infrastructure in the Russian regions on permafrost // *Environmental Research Letters*. 2019. V. 14 (2). Iss. 025003.
 21. Tavakoli S., Gilbert G., Kydland L.A.O., Frauenfelder R., Forsberg C.S. Geoelectrical properties of saline permafrost soil in the Adventdalen valley of Svalbard (Norway), constrained with in-situ well data // *J. of Applied Geophysics*. 2021. V. 195. Iss. 104497.
<https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2021.104497>

DEFORMATIONS OF BUILDINGS ON FROZEN SALINE SOILS DUE TO CLIMATE CHANGE (THE CASE OF AMDERMA VILLAGE, RUSSIA)

Yu. V. Chernyak^{a,#}, S. V. Badina^{b,c,##}, and A. V. Brushkov^{a,###}

^a*Geological Faculty, Lomonosov Moscow State University,
 Leninskie Gory 1, Moscow, 119991 Russia*

^b*Plekhanov Russian University of Economics,
 Stremyanniy per. 36, Moscow, 117997 Russia*

^c*Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University,
 Leninskie Gory 1, Moscow, 119991 Russia*

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

^{##}*E-mail: bad412@yandex.ru*

^{###}*E-mail: brouchkov@geol.msu.ru*

To date, there is no comprehensive geotechnical monitoring of pile foundations for residential and industrial buildings in Russian regions located in the permafrost zone and, accordingly, there is no reliable information about which part of them annually undergoes deformations caused by changes in geocryological conditions. This study presents the results of fieldwork on inspection of buildings in Amderma village (Zapolyarny district of the Nenets Autonomous Okrug, the North-East of the European part of Russia, part of the Arctic zone of the Russian Federation). The article presents the main reasons for the deformation of buildings in Amderma. Data were collected on climatic and permafrost conditions and their dynamics, construction features and the current state of engineering structures of Amderma. Based on studies of engineering structures, a general description of the buildings is given. It was identified that in 2021, 59% of the total number of buildings were deformed, of which 80% were wooden, 46% brick and concrete, and 31% buildings made of light structures.

Thus, only 40% of the heat-generating facilities in Amderma are not deformed. The main factors of foundation deformations are identified: soil salinity; watering underground or directly near the building; thermokarst in the building area; coastal processes; rise in temperature due to climate change or creep in the base soil. The results of the study made it possible to fill in local information “gaps” for the Arctic coast of the Nenets Autonomous Okrug in the range of works devoted to the problem of buildings and structures deformations. The new results obtained can be integrated with other similar studies.

Keywords: *permafrost, geocryological risks, frozen saline soils, climate change, fixed assets, Arctic zone of the Russian Federation*

REFERENCES

1. Brouchkov, A.V. Saline frozen rocks of the Arctic coast, their origin and properties. Moscow, MGU Publ., 1998. (in Russian)
2. Bulygina, O.N., Razuvaev, V.N., Trofimenko, L.T., Shvets, N.V. Description of the data array of the average monthly air temperature at the stations of Russia. URL: <http://meteo.ru/data/156-temperature> (in Russian)
3. Velli, Yu.Ya. Studies of saline permafrost soils of the Arctic coast (review). S.S. Vyalov, Ed., Moscow, Nauka Publ., 1990, pp. 9–20. (in Russian).
4. Karpenko, F.S., Kutergin, V.N., Frolov, S.I., and Sobin, R.V. The influence of variations in hydrate film properties on the strength of clay soils upon thermal impacts. *Geoekologiya*, 2021, no. 1, pp. 69–78. (in Russian)
5. Karpenko, F.S., Kutergin, V.N., Dernova, E.O., and Osokin, A.A. Methods of studying the properties of frozen soils and prediction of their changes. *Geoekologiya*, 2022, no. 2, pp. 80–87. (in Russian)
6. Map of Pliocene-Quaternary formations: R-41 (Amderma). State geological map of the Russian Federation. Third generation. Map of the Pliocene-Quaternary formations. Yuzhno-Kara series, scale: 1 : 1000000, series: Yuzhno-Karskaya. Lopatin, B.G., Ed., MAGE, FGBU “VSEGEI” Publ., 2008
7. Maslakov, A.A., Kuzyakin, L.P., Komova, N.N. Dynamics of the development of a thermocircus containing a bed of massive ice near the village of Lavrentiya (Chukotka Autonomous Okrug) for 2018-2021. *Arktika i Antarktika*, 2021, no. 4, pp. 32–46. (in Russian)
8. Draft (amendment) of the master plan of the municipality “Amderma village” of the Nenets Autonomous Okrug. Explanatory note. Omsk, Geonika Territory Development Agency. 2017. (in Russian)
9. Recommendations for monitoring the state of soils of bases and foundations of buildings and structures on permafrost soils. NIIOSP. Moscow, Stroyizdat, 1982. (in Russian)
10. Guidance on observations of deformations of foundations of buildings and structures. NIIOSP. Moscow, Stroyizdat, 1975. (in Russian).
11. Tumskoi, V.E., Torgovkin, N.V., Romanis, T.V. Thermocircuses of Yakutia. *Rel'ef i chetvertichnye obrazovaniya Arktiki, Subarkтики i Severo-Zapada Rossii*. 2021, no. 8. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/termot-sirki-yakutii> (date of access: 04/12/2023) (in Russian)
12. Badina, S.V. Estimation of the value of buildings and structures in the context of permafrost degradation: The case of the Russian Arctic. *Polar Science*, 2021, vol. 29, iss. 100730. <https://doi.org/10.1016/j.polar.2021.100730>
13. Biggar, K., Segoo, D. The strength and deformation behavior of model adfreeze and grouted piles in saline frozen soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 2011, vol. 30, pp. 319–337. <https://doi.org/10.1139/t93-027>
14. Gilbert, G.L., Instanes, A., Sinitsyn, A.O., Aalberg, A. Characterization of two sites for geotechnical testing in permafrost: Longyearbyen, Svalbard [J]. *AIMS Geosciences*, 2019, vol. 5 (4), pp. 868–885. <https://doi.org/10.3934/geosci.2019.4.868>
15. Hivon, E.G., Segoo, D. Strength of frozen saline soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 1995, vol. 32, pp. 336–354. <https://doi.org/10.1139/t95-034>
16. Hjort, J., Karjalainen, O., Aalto, J. et al. Degrading permafrost puts Arctic infrastructure at risk by midcentury. *Nature communications*, 2018, vol. 9 (1), iss. 5147.
17. Melnikov, V.P., Osipov, V.I., Brouchkov, A.V. et al. Climate warming and permafrost thaw in the Russian Arctic: potential economic impacts on public infrastructure by 2050. *Natural Hazards*, 2022, vol. 112, pp. 231–251.
18. Miller, D.L., Johnson, L.A. Pile settlement in saline permafrost: a case history. Proceedings, 5th Canadian Permafrost Conference. Quebec, Que., 1990, pp. 371–378.
19. Sinitsyn, A., Løset, S. Strength of frozen saline silt under triaxial compression with high strain rate. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2011, vol. 48. <https://doi.org/10.1007/s11204-011-9148-2>
20. Streletskiy, D.A., Suter, L., Shiklomanov, N.I. et al. Assessment of climate change impacts on buildings, structures and infrastructure in the Russian regions on permafrost. *Environmental Research Letters*, 2019, vol. 14 (2), iss. 025003.
21. Tavakoli, S., Gilbert, G., Kydland, L.A.O., Frauenfelder, R., Forsberg, C.S. Geoelectrical properties of saline permafrost soil in the Adventdalen valley of Svalbard (Norway), constrained with in-situ well data. *Journal of Applied Geophysics*, 2021, vol. 195, iss. 104497. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2021.104497>

УДК 627.141.1

ОТЛИЧИТЕЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ КАРЧЕХОДОВ НА СЕЛЕВЫХ ВОДОТОКАХ о. САХАЛИН

© 2023 г. С. В. Рыбальченко^{1,*}¹ФГБУН Специальное конструкторское бюро средств автоматизации морских исследований ДВО РАН,
ул. Максима Горького, 25, Южно-Сахалинск, 693000 Россия

*E-mail: rybalchenko_sv@mail.ru

Поступила в редакцию 23.01.2023 г.

После доработки 04.04.2023 г.

Принята к публикации 19.05.2023 г.

В работе рассмотрены региональные особенности явлений карчеходов на селевых реках о. Сахалин, установлены закономерности селеформирования на реках и их селевой режим, изучены факторы формирования карчеходов, характерные для селеносных водотоков о. Сахалин, а также отличия карчеходов на селевых и неселевых водотоках. Именно зональные факторы, обусловленные геопространственным положением и геологической историей развития территории о. Сахалин, формируют природно-территориальный комплекс возникновения карчеходов и заломов на реках остова и обуславливают его особенности. Карчеходы и заломы на селеносных и неселеносных реках Сахалина обладают рядом отличий, обусловленных физическими характеристиками селевой массы и динамикой селевых потоков. Различия формирования карчеходов рассмотрены в качестве особенностей компонентов их открытой геосистемы, в том числе карчей и транспортирующей среды. Это позволяет при полевом рекогносцировочном обследовании идентифицировать перемещенные селем карчеходы по косвенным признакам: значительная переработка древесины с включением большого количества мелкой, грубообработанной фракции в виде щепы, устойчивые несортированные древесно-аллювиальные отложения, поперечное расположение древесных остатков в заламах по оси русла. Отличительной чертой транспортирующей среды на селеносных реках является ее более высокая плотность, что увеличивает ее транспортирующую способность и обуславливает возможность передачи высокого энергетического импульса при движении. При этом даже в относительных небольших руслах могут встречаться достаточно крупные карчи, которые способна перемещать селевая масса.

Ключевые слова: селевой поток, карчеход, заломы, экзогенные процессы на склонах, эрозия берегов рек

DOI: 10.31857/S0869780923040070, EDN: DFYXYS

ВВЕДЕНИЕ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

На территории России карчеходы распространены повсеместно, наиболее широко в таежной зоне, лесотундре и зоне широколиственных лесов, реже встречаются в зоне субтропических лесов, лесостепи, в областях высокой поясности. В связи с географическими особенностями (значительной меридиональной протяженностью и разнообразным рельефом) на территории о. Сахалин встречаются таежные, горно-таежные и лесотундровые зоны, а также зоны широколиственных лесов, территории которых наиболее подвержены карчеходам. Территория острова характеризуется высокой густотой речной сети — 1.22 км/км² (при средней густоте речной сети по России — 0.49 км/км²) [12]. Среди регионов России Сахалинская область занимает второе место после Псковской области по густоте речной сети. Высокая густота речной сети и разнообразие специфических ландшафтов обуславливают широкое распространение карчеходов на территории Сахалина.

Карчеходы представляют угрозу для водопропускных сооружений при непосредственном ударном воздействии на их конструктивные элементы, а также при формировании заломов (сплошных завалов русла или водопропускных сооружений древесины) [4]. Это приводит к подпруживанию русла и последующему переливу или прорыву верхнего бьефа, и, как следствие, к повреждению или разрушению водопропускных сооружений (мостов, труб, каналов и др.), размыву дорожных насыпей, дамб, нижнего бьефа, подтоплению и затоплению территории. Наиболее опасны карчеходы и заломы на селитебных территориях в связи с высокой угрозой для населения, объектов жилой застройки и хозяйственной деятельности, а также значительным антропоген-

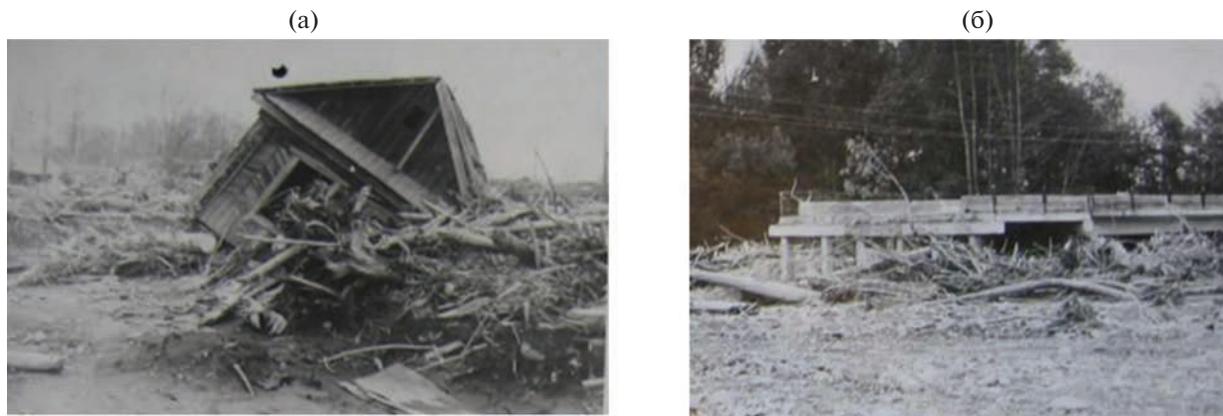


Рис. 1. Повреждение строений (а) и сооружений транспортной инфраструктуры (б) карчеходами в период прохождения тайфуна Филлис 5–6 августа 1981 г. на территории о. Сахалин.

ным влиянием на гидрографическую сеть территории.

В связи с географическими особенностями региона и историей освоения территории большинство населенных пунктов, объектов транспортной инфраструктуры и хозяйственной деятельности расположены по берегам рек или в их устьевой части. Дорожно-транспортная сеть вытянута меридионально вдоль прибрежной полосы и пересекает большое количество водотоков, которые в месте впадения имеют преимущественно широтное расположение.

Данные обстоятельства обуславливают высокую угрозу карчеходов для селитебных территорий и транспортной сети о. Сахалин, а также актуальность исследования подобных явлений. Так, во время прохождения тайфуна “Филлис” 5–6 августа 1981 г. карчеходы являлись одной из главных причин разрушения домов и других строений, мостовых переходов, деформаций русел рек на территории Южного и Среднего Сахалина. Ряд населенных пунктов, расположенных вблизи рек, оказались завалены карчами; строения и мостовые устои разрушались от ударов плывущих карчей (рис. 1).

Только по объектам Сахалинского производственного управления строительства и эксплуатации автомобильных дорог было разрушено 102 автомобильных моста общей протяженностью 2,5 км, а также множество мостов и водопропускных труб на внутрихозяйственных дорогах других ведомств. Было отмечено, что наиболее активно карчеходы возникали именно на селеносных реках. В настоящее время также отмечается подобная тенденция, особенно в период сезонных паводков и выхода глубоких летних циклонов на территорию острова.

На территории о. Сахалин наибольшую опасность карчеходы на селеносных реках представ-

ляют для малых водопропускных сооружений, в том числе водопропускных труб и однопролетных мостовых сооружений с низкой высотой подмостового пространства (согласно СП 35.13330.2011 “Мосты и трубы” на 0,5 м выше максимального расчетного уровня паводка 1% обеспеченности). Зачастую в связи с отсутствием возможности пропуска селевого потока и карчехода эти водопропускные сооружения оказываются полностью забиты, а их конструктивные элементы разрушены, либо подмыты [14].

Проблема угрозы карчеходов на селеносных реках актуальна и для соседних регионов со схожими природными условиями. Так, в Японии многие населенные пункты расположены в устьях залесенных горных селеносных рек. Во время крупных наводнений или в период селепрохождения эти потоки переносят высокие концентрации карчей, которые резко увеличивают их разрушительную силу [20].

Цель данного исследования – изучение региональных особенностей прохождения карчеходов на селеносных водотоках о. Сахалин для дальнейшей возможности теоретического обоснования разработки рекомендаций по их предотвращению и снижению ущерба.

Для исследования региональных особенностей необходимо установить закономерности селеформирования на реках Сахалина и их селевой режим, изучить факторы формирования карчеходов, характерные для селеносных водотоков острова, а также отличия карчеходов на селевых и неселевых водотоках.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В разные годы изучению формирования карчеход и заломов были посвящены работы В.Н. Домогашева, В.Е. Сергутина, Ю.Ф. Чемякова, Н.С. Евсеева, С.Р. Чалова [5, 6, 15, 16], в кото-

рых были освещены условия формирования карчеходов и заломов, а также руслоформирующая роль заломов древесной растительности. Из зарубежных исследований аналогичным вопросам были посвящены работы R.L. Beschta, G.E. Grant, F. Iseya, H. Ikeda, Y. Ishikawa, T.E. Lisle, G.W. Lienkaemper, F.J. Swanson и др. [17–23].

Ю.Ф. Чемяков один из первых выполнил работы по классификации заломов на основе их морфологических типов и впервые описал древесные аллювиальные отложения, обладающие отсутствием в них сортировки материала, слабой окатанностью, своеобразной текстурой и формой отдельных компонентов, отсутствием слоистости. Эти признаки древесных аллювиальных отложений характерны для наносоводных потоков, однако, ранее при исследовании карчеходов и заломов на реках не относились к признакам проявления селевых процессов и селеносности рек.

Отдельно стоит отметить значительный объем экспериментальных данных, накопленный при моделировании явлений карчеходов и заломов в искусственных каналах. В разные годы серии подобных экспериментов проводились на базе Университета штата Орегон и Лесной службы Тихоокеанской северо-западной исследовательской станции (США) [26]. Практические экспериментальные данные с крупноразмерными моделями карчей были получены В.Н. Домогашевым при разработке методов проектирования мостовых переходов в условиях карчехода, которые впоследствии нашли отражение в нормативной технической литературе. Отдельные эксперименты с использованием влекомых наносов, имитирующих селевые паводки и наносоводные потоки низкой плотности, проводились Университетом Цукуба и Научно-исследовательским институтом общественных работ (Япония) под руководством F. Iseya и H. Ikeda [19]. В целом специализированные исследования движения карчеходов на селеносных реках проводились разными авторами лишь эпизодически в рамках смежных исследований карчеходов или селевых процессов.

В ходе упомянутых экспериментальных работ был накоплен и проанализирован значительный массив данных, на основе которого уточнены общие закономерности вовлечения в движение карчеходов и заломов, а также динамика и взаимодействие самих карчей в потоке, что позволило автору настоящей статьи с привлечением собственных полевых данных провести сравнительный анализ явлений карчеходов на селеносных и неселеносных водотоках на территории о. Сахалин.

Автором с 2008 г. проведены многолетние полевые исследования селеносных водотоков на территории о. Сахалин, а также формирующихся на них карчеходов, в том числе в периоды паводков и селепрохождения. Работы проводились в

рамках научной деятельности, научно-технического сопровождения инженерных изысканий в части опасных экзогенных процессов. В ходе указанных работ были выполнены наблюдения за возникновением и развитием карчеходов и заломов, измерение параметров карчей, а также исследование селевых процессов; был проведен анализ массивов данных по обсуждаемой проблематике, полученный отечественными и зарубежными исследователями [17–26], а также в рамках собственных экспериментов [11]. Проведен сравнительный анализ явлений карчеходов и заломов на селеносных реках в других регионах на основе отдельных эпизодических наблюдений, в том числе в границах криолитозоны на территории Магаданской области и Станового нагорья.

КАРЧЕХОДЫ НА РЕКАХ О. САХАЛИН

Карчеходы и заломы наиболее характерны для территории Среднего и Южного Сахалина. Территория Северного Сахалина наименее подвержена данным явлениям в связи с преобладанием обширных участков равнинной местности лесотундры с более низким бонитетом произрастания древесной корчеходформирующей растительности, уменьшением общего количества осадков и циклонической активности, и, как следствие, более низкой водностью водотоков.

Породный состав карчеходов на территории Сахалина разнообразен и зависит от природного ландшафта, в связи с чем условно можно выделить карчеходы широколиственных пойменных лесов с преобладанием ивы, тополя, реже березы и осины, а также карчеходы хвойных горно-таежных, в отдельных случаях таежных лесов с преобладанием пихты, ели и лиственницы. Параметры карчей зависят от бонитета участка произрастания, а также лимитирующих факторов (патогенов и вредителей леса, лесных пожаров, ураганов и т.д.), ограничивающих максимальные размеры древостоя.

Наиболее крупный древостой смешанных лесов может достигать 30–35 м в высоту при диаметре ствола до 0.9 м. Его размеры значительно снижаются в прибрежных зонах в зоне воздействия штормовых ветров. На обширных открытых прибрежных участках, например, на территории Поронайской низменности, высота древостоя редко превышает 20 м при диаметре до 0.5 м и часто имеет искаженную флаговую архитектуру. Из-за особенностей бонитета, лимитирующих факторов, архитектуры корчеходобразующих пород и переработки карчи в потоке на территории Сахалина размеры карчей редко превышают 10–12 м в длину при диаметре до 0.8–0.9 м, при этом диаметр мильдю корня карчи может достигать 2–3 м, что значительно влияет на общую динамику карчи в потоке.



Рис. 2. Поступление твердой фазы и древесной растительности в русло при развитии склоновых процессов в бортах долины р. Кормовая (Средний Сахалин, 2018).

На крупных равнинных реках карчеходы отмечаются ежегодно, что связано с сезонными паводками и повторным переотложением карчей и заломов в русловой и пойменной части. Карчи преимущественно движутся в незагруженном режиме транспортировки (без взаимодействия друг с другом) и занимают менее 10% площади поверхности потока (классификация режима транспортировки карчехода приведена согласно [26]). Во время крупных паводков, сопряженных с формированием наносоводных потоков и селевых паводков (периодичностью раз в 5–7 лет), отмечается полузагруженный режим движения карчехода (площадь карчехода составляет 10–30%) с большим количеством контактных взаимодействий карчей и их взаимным влиянием друг на друга, что часто сопровождается формированием заломов. В процесс карчехода вовлекается значительное количество свежей древесины с территории подрабатываемых надпойменных террас и берегов. В составе карчехода отмечается значительное содержание крупных, не переработанных карчей и мелких растительных остатков.

На горных реках карчеходы отмечаются исключительно при крупных паводках либо селепрохождении. Частота формирования карчехода достигает раз в 3–5 лет. Карчи движутся в перегруженном режиме (площадь карчехода составляет более 33%) единым массивом, при селепрохождении в одном конгломерате вместе с селевой массой. Заломы формируются гораздо чаще и приурочены к участкам замедления потока: при стесненном или выположенном русле, меандрировании, увеличении шероховатости русла и др.

На горных водотоках мелкие древесные остатки практически сразу выносятся по руслу и не аккумулируются. Крупные карчи, напротив, даже при значительной переработке долгое время со-

храняются в заламах. По геохронологическим данным лихенометрии возраст отдельных заломов достигает 10–15 лет.

СЕЛЕВОЙ РЕЖИМ РЕК О. САХАЛИН

Большинство рек и малых водотоков Сахалина являются селеносными, за исключением наиболее крупных равнинных рек (Тынь, Поронай, Найба, Сусуя), долины которых приурочены к системе Центрально-Сахалинского тектонического разлома. Источником твердого питания селей служат современные отложения различного генезиса (делювиальные, пролювиальные, аллювиальные, прибрежные морские), сложенные раздельно зернистыми или слабо литифицированными горными породами, а также горные породы аналогичного литологического состава более древних свит.

В горной местности селеносность рек обусловлена широким развитием склоновых геодинамических процессов в бортах долин (оползней, осыпей, склоновых селей и др.), сложенных относительно слабыми горными породами (рис. 2). Геодинамические процессы обеспечивают поступление твердой фракции в тальвеги и русла, которая впоследствии выносятся при паводках в виде селей и влекомых наносов. На данных участках наиболее развит сдвиговый и эрозионно-сдвиговый селевые процессы, которые приводят к формированию связанных грязевых и грязекаменных селей.

Селевой режим горных рек и малых водотоков о. Сахалин характерен своей цикличностью. В большинстве случаев период селеформирования предшествует периоду накопления потенциального селевого массива при активном выветривании горных пород в очагах твердого пи-



Рис. 3. Древесно-грунтовые (пролювиальные) отложения на селеносном водотоке. (Автодорога Южно-Сахалинск—Оха. Средний Сахалин, 2018).

тания, которые при последующем обводнении вовлекаются в селевой процесс. При выпадении обильных осадков могут отмечаться как единичные, так и массовые случаи селеформирования в зависимости от степени предварительного выветривания и обводнения потенциальных селевых массивов в пределах селевых бассейнов. Таким образом, геологический фактор играет определяющую роль, а гидрометеорологический подчиненную и служит триггером в процессе селеформирования [8, 10].

Наибольший вклад в процесс формирования потенциальных селевых массивов вносят силы физического, а именно морозного выветривания. В связи с чем в большинстве случаев селеформирования глубина захвата горных пород не превышает глубины деятельного слоя цикла сезонного замораживания-оттаивания грунтов.

Частота селеформирования в горной местности в среднем составляет 1 раз в 3–5 лет для небольших селевых бассейнов (врезов, долин ручьев), для крупных селевых бассейнов 1 раз в 5–10 лет (для малых рек) [8, 10, 13] (рис. 3). В отдельных молодых и активно растущих селевых бассейнах сели могут отмечаться ежегодно, также возможно формирование нескольких селей в течение года во время весенних и летне-осенних пиков активизации геодинамических процессов.

На равнинных реках острова отмечается формирование селей в виде наносоводных потоков, реже — связанных селей. Истоки большинства равнинных рек на территории острова являются селеносными, поскольку приурочены к макросклонам основных горных сооружений и распо-

ложены в горной местности. На таких водотоках в их равнинной части отмечается формирование наносоводных потоков при движении и осветлении селей по руслу, сформировавшихся в горной местности. В редких случаях отмечается выход в предгорную долину связанных грязевых и грязекаменных селей больших объемов. Также на равнинных участках предгорных долин отмечается формирование наносоводных потоков при развитии эрозионно-транспортного селевого процесса во время паводков. Прогрессирующий рост содержания влекомых наносов в потоке приводит к активной абразии берегов, глубинной эрозии русла и срыву его аллювиальной отмостки. Происходит формирование наносоводного селевого потока, сопряженного с вовлечением значительного объема руслового и пойменного аллювия в селевой процесс. Наносоводные потоки формируются на равнинной местности острова ежегодно в период паводков. Один раз в 10–15 лет происходит формирование наносоводных потоков значительных объемов, которые могут достигать нескольких сотен тысяч кубических метров.

ФАКТОРЫ И РЕГИОНАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ КАРЧЕХОДОВ

Среди основных факторов формирования карчеходов следует выделить геолого-геоморфологические, гидрометеорологические, геоботанические и антропогенные. Данные факторы общие для всех территорий, подверженных формированию карчеходов, однако благодаря региональным

особенностям территории о. Сахалин они определяют специфические условия возникновения карчеходов.

Геолого-геоморфологические факторы обусловлены историей формирования макрорельефа острова при активном тектоногенезе и режимом накопления осадков. В макрорельефе территории Сахалина выделяются две крупные горные системы Восточно- и Западно-Сахалинские горы, имеющие субмеридиальную протяженность, расположенные вдоль восточного и западного побережья острова. Орогенез макрорельефа Сахалина активно протекал в период формирования пояса Альпийской складчатости, особенно активно 1.8 млн л.н., наряду с формированием макрорельефа центральной впадины Японского моря, Татарского пролива и островодужной системы Японских островов. В связи с тем, что в геологическом отношении Сахалинский террейн формировался преимущественно морскими глубоко-водными и мелководными осадками, в геологическом строении острова преобладают третичные осадочные горные породы (аргиллиты, алевролиты, пески, глины, песчаники и др.), со спорадическим распространением магматических и метаморфических горных пород [1, 2]. Таким образом, наиболее крупные горные системы острова сложены терригенными, частично метаморфизованными толщами верхнемелового, палеогенового и неогенового возрастов, смятыми в складчатые структуры при активном орогенезе. Горные породы сильно дислоцированы и характеризуются слабыми фильтрационными свойствами, хорошей размокаемостью, размываемостью (неразмывающие скорости 2.1–5.5 м/с) и набухаемостью, низким сцеплением и углом внутреннего трения, низкой стойкостью к выветриванию и др., что приводит к высокой частоте и глубине расчленения рельефа [2]. Геолого-геоморфологические факторы способствуют тому, что горные сооружения прорезаны множеством долин субширотного простиранья.

Большинство рек на о. Сахалин относится к категории горных и представлено V-образными долинами с крутыми бортами и значительным продольным уклоном русла. Диапазон водосборных бассейнов лежит в интервале абсолютных высот 350–1200 м при глубине расчленения рельефа 250–1000 м. Реки имеют малую длину, большие относительные высоты водосборов и уклоны русел. Площади большинства речных бассейнов составляют 1–15 км², длина водотоков – 3–10 км; средневзвешенный уклон русла – 40–60‰; максимальный уклон – более 100‰; уклоны водосборов малых рек могут достигать 500‰. Данные обстоятельства определяют малое время добегания паводочной волны при выпадении сильных осадков, вследствие чего на этих реках наблюдается резкий и сильный подъем уровней

воды, значительные скорости и деформации русла, что способствует вовлечению древесной растительности пойменных лесов в водный поток.

Стоит отметить, что особенности геологического строения и литологического состава обуславливают активное вовлечение горных пород в опасные склоновые экзогенные процессы гравитационного, водно-гравитационного и флювиального типа (сели, оползни, эрозия и др.). Активное развитие склоновых экзогенных процессов в бортах водосборных бассейнов обеспечивает поступление древесины в русла и тальвеги, которая впоследствии выносится паводками и селевыми потоками, а также твердой фазы из очагов твердого питания в водный поток. В результате плотность паводковых потоков зачастую приближается к плотности наносоводных потоков. При этом резко возрастает их эродирующая и абразионная способность, что существенно влияет на русловые деформации и вовлечение карчей. Потоки высокой плотности обладают повышенной транспортирующей способностью относительно карчей, поскольку увеличивают влекущую силу потока, воздействующую на мидель корневой системы карчи, а также увеличивают плавучесть карчи в связи с увеличением выталкивающей архимедовой силы; зачастую в наносоводных потоках карчи движутся в стесненных условиях. Наносоводные потоки способны транспортировать карчи даже при относительно небольших уровнях путем ее волочения по дну до момента всплытия. Геологическое строение долин селеносных рек отличается более мощными отложениями незадернованного руслового и пойменного аллювия в виде побочной и осередков, которые активно вовлекаются в движение при прохождении паводка или селя и многократно переотлагаются.

В отличие от полноводных рек основным источником поступления карчей для малых водотоков Сахалина служат не русловые процессы, сопряженные с подмывом и абразией берегов, а активно протекающие в бортах водосборного бассейна склоновые экзогенные процессы, обусловленные геологическими особенностями региона.

Гидрометеорологические факторы обусловлены геопространственным окраинным положением о. Сахалин, расположенным в непосредственной близости от траектории движения тропических циклонов.

В течение года над Сахалином проходит около 100 циклонов, вызывающих усиление ветра, пасмурную с осадками погоду, а в конце лета и начале осени наблюдаются выходы глубоких тропических циклонов (тайфунов), зарождающихся вблизи экватора. Прохождение тайфунов сопровождается штормовыми ветрами, достигающими скорости более 40 м/с, и сильными дождями, за несколько



Рис. 4. Заломы из карчей широколиственных пород в подмостовом пространстве; р. Гребенская (Макаровский район, Средний Сахалин, 2021).

дней часто выпадает больше месячной нормы осадков [7].

Так, например, при прохождении тайфуна в сентябре 1947 г. в г. Долинск за сутки выпало 222 мм осадков при месячной норме 120 мм, в г. Южно-Сахалинск — 107 мм при месячной норме 106 мм [13]. Во время тайфунов “Оджин” и “Филлис” сумма осадков за период с 1 по 7 августа 1981 г. в г. Макаров составила 215 мм (при месячной норме 99 мм), в Южно-Сахалинске — 220 мм. За этот же период в горной местности в пределах Сунайского хребта на абсолютных отметках 400–500 м была зафиксирована сумма выпавших осадков 800–1200 мм [9].

Годовые суммы осадков в днищах долин и на морском побережье Сахалина изменяются от 400–500 мм на севере до 800–1200 мм на юге (в горах средние значения выпавших осадков в зависимости от высотной зоны колеблются в пределах 1500–2000 мм и в отдельные годы могут превышать 3000 мм) [3, 9]. В теплый период выпадает 65–80% годовой суммы осадков.

При прохождении мощных циклонов наблюдается значительное увеличение годового стока рек. Так, при среднегодовом стоке 57.2 км³/год в 2015 г. речной сток в Сахалинской области составил 82.7 км³/год (на 44% выше среднегогодового показателя). Увеличение суммарного годового речного стока произошло в связи с выходом на территорию острова 14 тропических циклонов в июле-октябре 2015 г. Наибольшие осадки на территорию принесли экс-тайфун “Чен-Хом”, “Кило”, “Дуцзюань”, экс-тропический циклон “Чой-Ван”.

Муссонный климат и циклоническая активность на территории острова приводят к частому формированию паводков в летний и осенний пе-

риод. Во время паводков происходит затопление стариц и пойм, что сопряжено с выносом в русло большого количества древесины и последующим формированием карчеходов и заломов.

За последнее время в связи с повышением температуры мирового океана на территории о. Сахалин циклоническая активность значительно усилилась. Так, за последние 5 лет в летне-осенний период отмечалось более 4 ливневых дождей вероятностью свыше 10%, что было связано с проявлением деятельности тропических циклонов. Учитывая общую тенденцию повышения температуры мирового океана, циклоническая активность и частота карчеходов на территории острова в ближайшее время будут стремительно возрастать.

Геоботанические факторы формирования карчеходов зачастую определяются породным составом карчей. Пойменные леса Сахалина преимущественно представлены типичными широколиственными лесами с преобладанием влаголюбивой растительности (ольха и ива). Данные породы произрастают на поймах и старицах рек, несмотря на активное развитие селевых процессов. Они легко переносят воздействие паводков, влекомых наносов, заиливание корневой шейки, которые не приводят к гибели древостоя, и непосредственное воздействие селевых потоков, что формирует специфические прижизненные пороки древесины в виде свилеватости стволов и ветвей, повышающие их устойчивость. В редких случаях в горно-таежном поясе отмечаются карчеходы хвойных пород.

Стоит отметить, что карчеходы широколиственных пойменных лесов чаще приводят к формированию заломов и представляют наибольшую опасность для водопропускных сооружений на территории о. Сахалин (рис. 4).

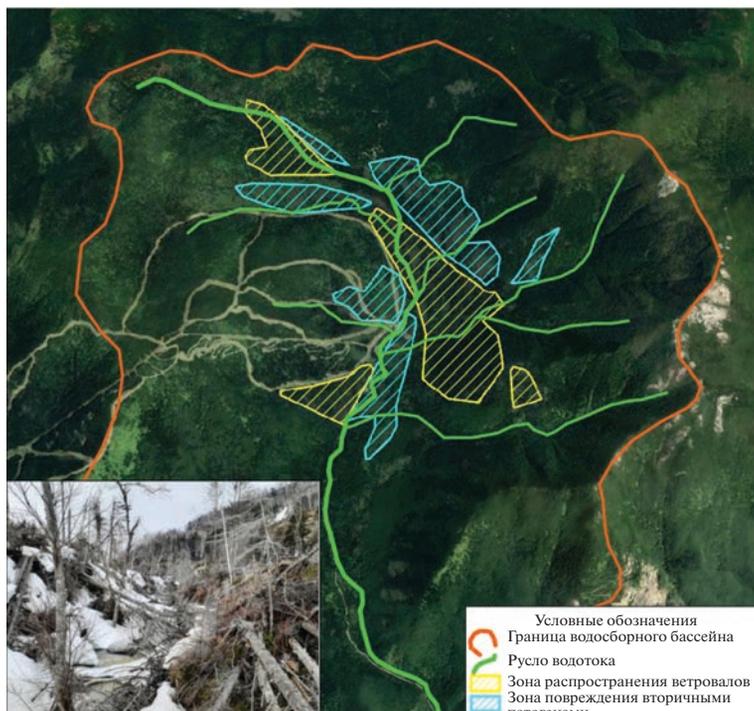


Рис. 5. Потенциальные источники поступления карчи на примере долины р. Марковка (Южный Сахалин, 2021).

Древостой широколиственных пород имеет густую раскидистую крону с мощными ветвями, при избыточном содержании азота в почве отмечается многостольность. Карчи широколиственных пород при стесненном движении в русле быстро формируют ядро залома, в котором происходит последующее активное отложение мелких обломков древесины, влекомых наносов и селевой массы, что приводит к созданию естественной древесно-грунтовой плотины, подпруживающей русло. При движении в потоке карчи широколиственных пород долгое время сохраняют большую часть скелетных ветвей кроны за счет высокой гибкости древесины, свилеватости и относительно большого диаметра скелетных ветвей, что предопределяет более равномерное распределение массы и инерции. Скелетные ветви кроны сохраняются даже при взаимодействии с препятствиями, в том числе береговыми устоями, опорами и пролетами мостов.

Карчи хвойных пород при движении в потоке и взаимодействии с препятствиями теряют большую часть ветвей, таким образом, хвойные карчи состоят из ствола и миделью корня.

Кроме того, существенный вклад в объем поступающих в русло карчей вносят обширные ветровалы, формирующиеся во время многочисленных циклонов при модуляции ветра в V-образных долинах и прибрежных зонах. В дальнейшем ветровальная древесина переносится склоновыми процессами и временными водотоками в тальвег

водосборного бассейна (рис. 5). Помимо ветровальной древесины, значительные площади сухостоя формируются при поражении леса патогенами, в том числе вторичными, которые при развитии на участках ветровала распространяются на окружающие лесные массивы.

Антропогенные факторы формирования карчеходов характерны для всех урбанизированных и селитебных территорий и выражаются в воздействии на гидрографическую сеть территории, что приводит к следующим последствиям:

- существенное увеличение и перераспределение склонового стока при сведении почвенно-растительного слоя, вертикальная планировка территории и создание площадей с твердым покрытием;
- переформирование русел и пойм при застройке прибрежной зоны;
- снижение пропускной способности живого сечения при строительстве каналов и прочих водопропускных сооружений, пересечении водотоков коммуникациям и инженерными сетями надземным способом при прокладке по эстакадам, подмостовым пространствам или по дну;
- значительная захламленность русел и пойм твердыми отходами (бытовыми, производственными, строительными), которые слабо подвержены биодegradации, способны накапливаться в значительных объемах и активно вовлекаться в формирование заломов при паводках.

ОТЛИЧИТЕЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ КАРЧЕХОДОВ НА СЕЛЕНОСНЫХ РЕКАХ САХАЛИНА

Формирование карчеходов и заломов на селеносных и неселеносных реках Сахалина обладает рядом отличий, обусловленных физическими характеристиками селевой массы и динамикой селевых потоков. Рассматривая явление карчехода как открытую геосистему, в которой непрерывно происходит обмен веществом и энергией между ее компонентами и окружающей средой, можно выделить ее основные компоненты: собственно карчи, транспортирующую среду, русло (как геоморфологическую единицу) и вмещающую геологическую среду. Определение особенностей карчеходов на селеносных реках наиболее удобно выполнить на основе определения особенностей каждого из компонентов указанной геосистемы. Отличительные черты селевых русел и вмещающей их геологической среды рассмотрены выше. Особенности карчей и транспортирующей их среды стоит рассмотреть более подробно в качестве компонентов геосистемы, учитывая их физические особенности и вклад в вещественно-энергетический баланс геосистемы.

Карчи в виде транспортируемых и отложившихся древесных остатков являются одним из главных источников твердого питания карчеходов. Необходимо отметить, что карчи, в отличие от вовлекаемых в поток обломков горных пород (валуны, песок, галька и др.), стоит выделять в качестве отдельного компонента геосистемы по ряду признаков.

Плотность отдельных минеральных частиц в потоке может колебаться от 1.2 т/м^3 для пористых вулканогенных пород до 3.2 т/м^3 для основных магматических и метаморфизованных пород, а крупность минеральных частиц от 0.01 мм для глинистых частиц до глыб из скальных горных пород размером в несколько метров в поперечнике. В связи с этим селевую массу относят к полиминеральным полидисперсным суспензиям. Обломки горных пород в русле, как правило, обладают значительной окатанностью, их форма стремится к форме гравитационного равновесия: либо шарообразной, либо кубовидной (при слабой окатанности). Обломки слоистых горных пород имеют эллипсоидную либо параллелепидную форму.

В отличие от обломков горных пород, древесные остатки обладают значительно меньшей и более однородной плотностью, которая в зависимости от породного состава древесины колеблется в пределах $0.45\text{--}0.65 \text{ т/м}^3$, что обеспечивает их плавучесть. Тогда как взвешенные минеральные частицы подвержены лишь медленному осаждению в стесненных условиях и не обладают истинной плавучестью. Относительно более однородна

и размерность древесных обломков, соотношение размеров наиболее крупных карчей ($10\text{--}12 \text{ м}$) и мелких переработанных древесных обломков ($1\text{--}2 \text{ см}$) редко превышает $1: 1500$, при том, что аналогичное соотношение крупности минеральных частиц горных пород (от 0.01 мм до $2\text{--}3 \text{ м}$) в русле может составлять $1: 200000$. Стоит отметить, что древесные обломки за счет сосудистого слоистого строения древесины, даже будучи подверженные значительной переработке, в потоке сохраняют вытянутую цилиндрическую форму. Таким образом, однородность плотности, размеров, формы и свойство плавучести древесных обломков относительно минеральных частиц и их значительный вклад в твердое питание потока позволяют их выделить в отдельный элемент геосистемы карчехода.

Отличительные особенности карчей на селеносных реках преимущественно выражаются в их более существенной переработке потоком. Вне зависимости от породного состава карчехода при транспортировке карчей селем, размер их редко превышает $5\text{--}7 \text{ м}$ за счет перемалывания древесины твердой грубодисперсной фракцией селевой массы. В древесных остатках селевых потоков отмечается повышенное содержание грубо переработанной древесины мелкой фракции в виде щепы, что позволяет идентифицировать древесно-аллювиальные отложения селевого потока от аналогичных отложений паводков и наносовых потоков.

Таким образом, физика переноса древесины отличается от физики переноса осадка из-за различий в форме, плотности и размере подвижных компонентов. Древесина имеет форму стержня, а не сферы, поэтому сила, действующая на площадь поперечного сечения частицы, больше для древесины, чем для осадка. Поскольку древесные обломки удлиненные, а их длина часто совпадает с шириной канала транспортировки, вероятность их столкновения с краем русла выше, чем у неорганических фрагментов, которые часто на много порядков меньше ширины канала. Более высокая вероятность столкновения с краем русла повышает вероятность того, что древесина будет отложена на неглубоких участках или застрянет у дна или береговых препятствий.

Отличительная черта транспортирующей среды на селеносных реках — ее более высокая плотность, которая может составлять $1.1\text{--}2.5 \text{ т/м}^3$, что увеличивает ее транспортирующую способность и обуславливает возможность передачи высокого энергетического импульса при движении. При этом даже в относительно небольших руслах могут встречаться достаточно крупные карчи, которые способна транспортировать селевая масса.



Рис. 6. Древесно-минеральные (пролювиальные) отложения на селеносном водотоке. (Автомобильная дорога Южно-Сахалинск–Оха. Средний Сахалин, 2018).

Момент захвата карчи и вовлечения ее в поток на селеносных реках возникает до момента флотации (всплытия) карчи, который, как правило, возникает при достижении потоком уровня, равного радиусу карчи либо милдью корня карчи (при его наличии). За счет высокого давления селевого потока до момента всплытия карча в селевом потоке перемещается волочением.

В отличие от водных потоков, в селевом потоке карчи движутся в загруженном режиме совместно с селевой массой, поэтому их осаждение происходит при остановке самой селевой массы, в том числе в селевых грядах по краям селевого русла. Отложение карчей в водном потоке часто может происходить при взаимодействии с местными препятствиями либо при повышении шероховатости русла вследствие взаимодействия милдью корня карчи с дном. При транспортировке карчи в селевом потоке давление потока значительно превышает местные сопротивления и предел прочности древесины. Поэтому даже в относительно узких V-образных долинах горных селевых водотоков с коренным дном, сложенным грубодисперсным материалом, даже крупные карчи зачастую перемалываются селевой массой и проталкиваются ее импульсным воздействием по руслу до момента аккумуляции самого селевого потока.

В связи с совместным движением карчей и селевой массы в загруженном режиме отложения карчеходов на селевых водотоках не отличаются сортировкой древесных остатков по длине русла,

что характерно для прочих рек, где крупность отложений уменьшается по длине реки.

Древесно-аллювиальные отложения селевых водотоков формируют обширные заломы из несортированного материала, которые сохраняются длительное время и в период паводков приводят к значительному переформированию русла и образованию русловых островов (рис. 6).

Поскольку карчи в селевых потоках движутся в загруженном режиме, большая их часть отлагается в поперечном направлении в осевой части и в продольном направлении по периферии русла в селевых грядах. Данная закономерность обычно наблюдается на неселеносных водотоках при высокой плотности карчехода и загруженном режиме транспортировки, что также подтверждено экспериментальными моделями в искусственных каналах. В целом экспериментальные модели движения и отложения карчехода в загруженном режиме, описанные ранее, подтверждены автором при полевых наблюдениях за проявлениями карчехода на селеносных реках о. Сахалин.

Стоит отметить, что формирование карчеходов значительных объемов на реках Сахалина сопряжено исключительно с селепроявлением.

ВЫВОДЫ

В результате исследований установлено, что наиболее подвержены формированию карчеходов на территории о. Сахалин селеносные реки, представленные малыми горными водотоками, а также реками, расположенными в предгорной

местности. Селевой режим данных водотоков чрезвычайно активен. Это обусловлено наличием больших уклонов и геологическим строением водосборных бассейнов, сложенных раздельнозернистыми и слаболигифицированными горными породами, а также муссонным климатом и активной циклонической деятельностью на территории острова.

Среди основных факторов формирования карчеходов выделены геолого-геоморфологические, гидрометеорологические, геоботанические и антропогенные. Данные факторы общие для всех территорий, подверженных формированию карчеходов. Однако благодаря региональным особенностям территории Сахалина они определяют специфические условия возникновения карчеходов на острове.

Макрорельеф территории и геологическое строение основных горных сооружений Сахалинского террейна, сложенных преимущественно морскими отложениями, способствуют активному развитию склоновых экзогенных процессов в бортах водотоков, которые обеспечивают поступление в русло и тальвеги рек твердой фазы и древесной растительности, что приводит к их селезносности. Также к региональным особенностям стоит отнести большое количество жидких осадков, годовые суммы которых в долинах и на побережье составляют 800–1200 мм, а в горной местности могут достигать 1500–2000 мм. К региональным геоботаническим особенностям стоит отнести породный состав карчей, представленный преимущественно широколиственными породами (ива и ольха), которые в отличие от карчеходов хвойных пород более склонны к формированию заломов и наиболее опасны для водопропускных сооружений.

Таким образом, именно зональные факторы, обусловленные геопространственным положением и геологической историей развития территории острова, формируют природно-территориальный комплекс возникновения карчеходов и заломов на реках Сахалина, и обуславливают его особенности. Особенности различия формирования карчеходов на селевых и неселевых водотоках о. Сахалин рассмотрены на примере особенностей компонентов их открытой геосистемы (карчей и транспортирующей среды). Это позволяет при полевом рекогносцировочном обследовании идентифицировать по косвенным признакам карчеходы, перемещенные селем: значительная переработка древесины с включением большого количества мелкой, грубообработанной фракции в виде щепы, устойчивые несортированные древесно-аллювиальные отложения, поперечное расположение древесных остатков в заламах по оси русла.

Несмотря на высокую опасность проявления карчеходов на селеносных реках о. Сахалин, вопрос комплексной инженерной защиты объектов и территории от данных процессов остается нерешенным. Профилактические мероприятия по расчистке русел и пойм от древесных остатков и пойменной растительности имеют существенный экологический аспект, поскольку карчи играют важную роль в формировании экосистем нерестилищ и путей миграции к ним анадромных видов рыб, в том числе лососевых, имеющих важное хозяйственное значение. В данном случае профилактическая расчистка допустима только при непосредственной угрозе нанесения ущерба объектам и территориям при проявлении карчехода.

Особое внимание стоит уделять обеспечению пропускной способности карчехода через малые гидротехнические сооружения для недопущения их повреждения либо разрушения, а также вопросам своевременного устранения последствий карчеходов, в том числе разборе заломов в русле и на гидротехнических сооружениях.

Представленные результаты получены при финансовой поддержке государственного задания FWWW-2022-0001.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александров С.М. Остров Сахалин. М.: Наука, 1973. 182 с.
2. Геология СССР. М.: Недра. 1970. Т. 33. Ч. 1. 432 с.
3. Генсировский Ю.В., Казаков Н.А., Рыбальченко С.В. Гидрометеорологические условия периодов массового селеобразования на о. Сахалин // Тр. Междунар. конф. “Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита”. Пятигорск: Институт “Севкавгипроводхоз, 2008. С. 95–98.
4. Домогашев В.Н. Разработка метода проектирования мостовых переходов в условиях карчехода: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. Красноярск, 1984. 182 с.
5. Домогашев В.Н., Сергунов В.Е. Карчеход и русловой процесс // Геоморфология. 1987. № 2. С. 54–56.
6. Евсеева Н.С. Современный морфолитогенез юго-востока Западно-Сибирской равнины. Томск: Изд-во НТЛ, 2009. 484 с.
7. Земцова А.И. Климат Сахалина. Ленинград: Гидрометеоздат, 1968. 197 с.
8. Казаков Н.А. Массовое формирование селей в низкогорье о. Сахалин: условия и повторяемость // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2019. Т. 1. № 1. С. 14–30.
9. Казаков Н.А., Генсировский Ю.В. Влияние вертикального градиента осадков на характеристики гидрологических, лавинных и селевых процессов в низкогорье // Геоэкология. 2007. № 4. С. 342–347.
10. Казаков Н.А., Генсировский Ю.В. Грязекаменные сели катастрофических объемов в низкогорье острова Сахалин // Тр. Междунар. конф. “Селевые

- потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита". Пятигорск. 2008. С. 45–48.
11. Казаков Н.А., Боброва Д.А., Казакова Е.Н., Рыбальченко С.В. Исследование динамики селей на экспериментальном стенде // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2019. Т. 1. № 4. С. 491–503.
 12. Ресурсы поверхностных вод СССР: в 20 т. Т. 18 Дальний Восток. Вып. 4. Сахалин и Курилы / Под ред. М.Г. Васильковского. Л.: Гидрометиздат, 1973. 262 с.
 13. Рыбальченко С.В. Селевая опасность для населенных пунктов Сахалинской области // ГеоРиск. 2013. № 3. С. 40–44.
 14. Рыбальченко С.В., Оганезов А.С. Влияние дефектов систем водоотведения автомобильных дорог на изменение геосистем морских террас // Геоэкология. 2021. № 4. С. 24–41.
 15. Чалов С.Р., Ермакова А.С., Есин Е.В. Речные заломы: экологическая и руслоформирующая роль // Вестник Московского университета. Сер. 5: география. 2010. № 6. С. 25–31.
 16. Чемяков Ю.Ф. Заломы, их образование и развитие // Известия Всесоюзного географического общества. 1955. Т. 87. № 2. С. 134–136.
 17. Beshta R.L. The effects of large woody debris on channel morphology: a flume study // Proc. on the D.B. Simons Symposium on Erosion and Sedimentation. 1983. P. 863–878.
 18. Grant G.E. Effects of Wood Loading and Mobility on Channel Stability, Breitenbush River, Oregon // Report to the Detroit Ranger District, Willamette National Forest, 1987. 40 p.
 19. Iseya F., Ikeda H. Pulsations in bedload transport rates induced by Longitudinal Sediment Sorting: A flume study using sand and gravel mixture // Geografiska Annaler, 1987. 69 (1). P. 15–27.
 20. Ishikawa Y. Studies on Disasters Caused by Debris Flows Carrying Floating Logs Down Mountain Streams. PhD dissertation. Kyoto University, Japan. 1990. 121 p.
 21. Ishikawa Y., Kusano S., Fukuzawa M. Mudflow and floating log disaster in Ichinomiya Town, Kumamoto Pref. in 1990 // Japan-US Workshop on Snow Avalanche, Landslide, Debris Flow Prediction and Control. 1991. P. 487–496.
 22. Lisle T.E. Stabilization of a gravel channel by large streamside obstructions and bedrock bends, Jacoby Creek, northwestern California // Geological Society of America Bulletin, 1986. V. 97. P. 99–1011.
 23. Lienkaemper G.W., Swanson F.J. Dynamics of large woody debris in streams in old-growth Douglas-fir forests // Canadian Journal of Forest Research 1987. V. 17. № 2. P. 150–156.
 24. Nakamura F., Swanson F.J. Effects of coarse woody debris on morphology and sediment storage of a mountain stream system in western Oregon // Earth Surf. Process. Landforms. 1993. V. 18. № 1. P. 43–61.
 25. Haruka T., Slim M., Shiho A., Takashi O., Ushio K. Comparison of length and dynamics of wood pieces in streams covered with coniferous and broadleaf forests mapped using orthophotos acquired by an unmanned aerial vehicle // Progress in Earth and Planetary Science. 2021. V. 8. № 1. P. 1–16.
 26. Christian A. Brauderick, Gordon E. Grant, Yoshiharu Ishikawa, Hiroshi Ikeda. Dynamics of Wood Transport in Streams: A Flume Experiment // Earth Surface Processes and Landforms, 1997. V. 22 (7). P. 669–683. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9837\(199707\)22:73.0.CO;2-L](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9837(199707)22:73.0.CO;2-L)

DRIFTING TIMBER FORMATION ON MUDFLOW RIVERS ON SAKHALIN ISLAND

S. V. Rybalchenko^{a,*}

^aSpecial Research Bureau for Automation of Marine Research, Far East Branch, Russian Academy of Sciences,
ul. Maksima Gor'kogo 25, Yuzhno-Sakhalinsk, 693000 Russia

[#]E-mail: rybalchenko_sv@mail.ru

The paper considers the regional features of the phenomena of timber drifting on mudflow rivers on Sakhalin Island. The regularities of mudflow formation in Sakhalin rivers and their mudflow regime are established and the factors causing timber drifting in the debris flow watercourses of Sakhalin Island are studied. Due to the history of Sakhalin terrain and macrorelief formation, the main mountain structures are composed of marine sediments. This promotes mudflows on rivers, the active development of exogenous processes on river slopes, and the flow of solid phase and woody vegetation into the channel and talvegs. As a result, the density of streams increases, their eroding and abrasive ability rises, which affects significantly channel deformations and involves timber drifting. High-density flows have an elevated transporting capacity, since they increase the pulling force of the flow affecting the midsection of the drifting timber root system, and also raise the timber buoyancy due to an increase in the pushing Archimedean force. Also, regional features include a large amount of liquid precipitation, the annual amounts of which in the valleys and on the coast are 800–1200 mm, and in mountainous areas can reach 1500–2000 mm. The main species of drifting timber drifting include broad-leaved trees (willow and alder), which, unlike coniferous wood, are more prone to form logjams and are most hazardous for culverts.

Keywords: debris flow, timber drifting, logjams, slope exogenous processes, riverbank erosion

REFERENCES

1. Aleksandrov, S.M. Sakhalin Island. Moscow, Nauka Publ., 1973, 182 p. (in Russian)
2. Geology of the USSR. Moscow, Nedra Publ., 1970, vol. 33, part 1, 432 p. (in Russian)
3. Gensiorovskii, Yu.V., Kazakov, N.A., Rybal'chenko, S.V. Hydrometeorological conditions of mass mudflow formation periods on Sakhalin Island. In: Proc. Intern. Conf. "Mudflows: disasters, risk, forecast, protection". Pyatigorsk, 2008, pp. 95–98. (in Russian)
4. Domogashev, V.N. [Development of a method for designing bridge crossings in the conditions of drifting timber mudflows. Extended abstract Cand. Sci. (Techn.) Diss., Krasnoyarsk, 1984, 182 p. (in Russian)
5. Domogashev, V.N., Sergunov, V.E. Drifting timber and riverbed process. *Geomorfologiya*, 1987, no. 2, pp. 54–56. (in Russian)
6. Evseva, N.S. [Modern morpholithogenesis in the southeast of the West Siberian plain. Tomsk, NTL Publ., 2009, 484 p. (in Russian)
7. Zemtsova, A.I. Climate of the Sakhalin island. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1968, 197 p. (in Russian)
8. Kazakov, N.A., Gensiorovskii, Yu.V. [Influence of the vertical precipitation gradient on the characteristics of hydrological, avalanche and mudflow processes in the low mountains. *Geoekologiya*, 2007, no. 4, pp. 342–347. (in Russian)
9. Kazakov, N.A., Gensiorovskii, Yu.V. Mud-stone mudflows of catastrophic volumes in the low mountains of Sakhalin Island. In: Proc. Intern. Conference "Mudflows: disasters, risk, forecast, protection". Pyatigorsk, 2008, pp. 45–48. (in Russian)
10. Kazakov, N.A. Mass formation of mudflows in the Sakhalin low mountains: conditions and frequency. *Gidrosfera. Opasnye protsessy i yavleniya*, 2019, vol. 1, no. 1, pp. 14–30. (in Russian)
11. Kazakov, N.A., Bobrova, D.A., Kazakova, E.N., Rybal'chenko, S.V. Investigation of debris flow dynamics on an experimental stand. *Gidrosfera. Opasnye protsessy i yavleniya*, 2019, vol. 1, no. 4, pp. 491–503. (in Russian)
12. Kazakov, N.A., Bobrova, D.A., Kazakova, E.N. Investigation of an artificial mudflow velocity on a laboratory stand. *Gidrosfera. Opasnye protsessy i yavleniya*, 2020, vol. 2, no. 4, pp. 405–417 (in Russian)
13. Surface water resources in the USSR. Vol. 18. The Far East. Issue 4. Kuril Islands and Sakhalin. Vaskovskii, M.G., Ed., Leningrad, Gidrometizdat Publ., 1973, 262 p. (in Russian)
14. Rybal'chenko, S.V. The mudflow hazard for settlements of the Sakhalin region. *GeoRisk*, 2013, no. 3, pp. 40–44. (in Russian)
15. Chalov, S.R., Ermakova, A.S., Esin, E.V. River logjams: ecological and channel-forming role. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5: Geografiya*, 2010, no. 6, pp. 25–31. (in Russian)
16. Chemekov, Yu.F. Logjams, their formation and development. *Izvestiya Vsesoyuznogo geograficheskogo obshchestva*, 1955, vol. 87, no. 2, pp. 134–136. (in Russian)
17. Ishikawa, Y. Studies on disasters caused by debris flows carrying floating logs down mountain streams. Doctoral thesis. Kyoto University, Japan. 1990. 121 p.
18. Lienkaemper, G.W., Swanson, F.J. Dynamics of large woody debris in streams in old-growth Douglas-fir forests. *Canadian Journal of Forest Research*, 1987, vol. 17, no. 2, pp. 150–156.
19. Nakamura, F., Swanson, F.J. Effects of coarse woody debris on morphology and sediment storage of a mountain stream system in western Oregon. *Earth Surf. Process. Landforms*. 1993, vol. 18, no. 1, pp. 43–61.
20. Haruka, T., Slim, M., Shiho, A., Takashi, O., Ushio, K. Comparison of length and dynamics of wood pieces in streams covered with coniferous and broadleaf forests mapped using orthophotos acquired by an unmanned aerial vehicle. *Progress in Earth and Planetary Science*, 2021, vol. 8, no.1, pp. 1–16.

ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

УДК 551.345; 551.4.042; 624.131.1

**РАЗВИТИЕ ЭКЗОГЕННЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ЯВЛЕНИЙ
НА АВТОМОБИЛЬНОЙ ДОРОГЕ “УДОКАН–НАМИНГА”
(СЕВЕРНОЕ ЗАБАЙКАЛЬЕ)**

© 2023 г. А. П. Кулаков^{1,*}, Д. О. Сергеев^{1,**}

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

*E-mail: cryolithozone@mail.ru

**E-mail: sergueevdo@mail.ru

Поступила в редакцию 11.05.2023 г.

После доработки 14.06.2023 г.

Принята к публикации 16.06.2023 г.

В работе рассмотрены экзогенные геологические процессы и явления на автомобильной дороге “Удокан–Наминга” в 2017 г., которые сопоставлены с предыдущими результатами, полученными экспедицией МГУ им. М.В. Ломоносова в 1986 г. Проанализированы инженерно-геологические условия и особенности проявления процессов и явлений. По геологическим признакам выполнена типизация геокриологической обстановки (ТГО) и соответствующих им комплексов инженерно-геологических процессов и явлений. Сравнение результатов за разные годы показало, что характер процессов и явлений, а также их количество изменились незначительно. Наиболее активными и часто встречающимися процессами являются концентрированный вынос мелкозема и временные водопро- явления. Наибольшей деформации подверглись участки дороги, проходящие вдоль подрезанных склонов с курумным чехлом. Результаты исследования показывают, что особое внимание необходимо уделить именно курумам из-за их широкого распространения вдоль дороги и охлаждающего влияния на среднегодовые температуры окружающих грунтов.

Ключевые слова: автомобильная дорога “Удокан–Наминга”, горная криолитозона, хребет Удокан, Северное Забайкалье, экзогенные геологические процессы и явления

DOI: 10.31857/S0869780923040057, **EDN:** FNHCLP

ВВЕДЕНИЕ

Территория исследования расположена в Каларском округе Забайкальского края и приравнена к районам Крайнего Севера. Регион богат различными полезными ископаемыми (медные, железные и полиметаллические руды, каменный уголь, редкие и редкоземельные металлы, алюминиевое сырье), поэтому для дальнейшего освоения территории требуются строительство и безаварийная эксплуатация подъездных автомобильных дорог к месторождениям [5].

В физико-географическом отношении территория входит в систему Станового нагорья Южно-Сибирских гор, объект исследования – линейный участок автомобильной дороги “Удокан–Наминга” (первые 11 км от пос. Удокан), расположенный в пределах хребта Удокан (рис. 1).

Цель работы – исследование современного состояния участка дороги “Удокан–Наминга” и оценка развития экзогенных геологических процессов и явлений (ЭГПЯ) в начале ее строительства (1986 г.) и до начала ее реконструкции (2017 г.).

Главная задача состоит в изучении характера и количества ЭГПЯ на дороге “Удокан–Наминга” для сравнения полученной картины с охарактеризованной ранее обстановкой, зафиксированной работами экспедиции МГУ им. М.В. Ломоносова в 1986 г.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В начале исследования были изучены тематические литературные источники по Северному Забайкалью, а также отчет экспедиции МГУ им. М.В. Ломоносова 1986 г., в котором были описаны закономерности развития ЭГПЯ на автомобильной дороге. Также использовались и дешифровались современные космические спутниковые снимки и снимки, созданные с помощью беспилотного летательного аппарата. Проанализированы мерзлотные карты и карты четвертичных отложений. Измерены, обработаны и изучены данные по температурам горных пород в сква-

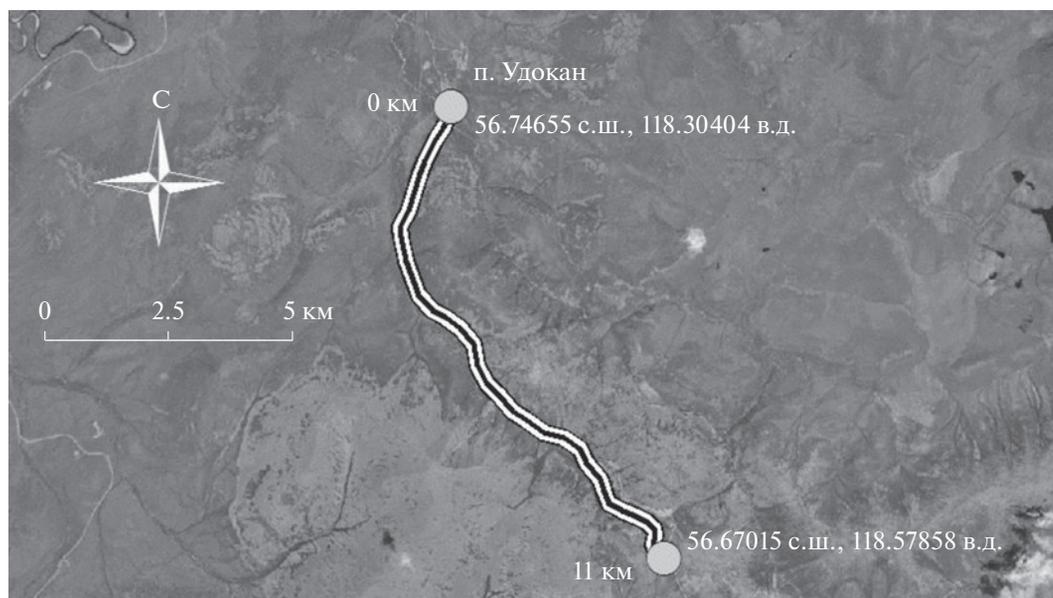


Рис. 1. Скриншот космического снимка ESRI Satellite с выделенным линейным участком автомобильной дороги “Удокан–Наминга” (первые 11 км от пос. Удокан), где исследовались ЭГПЯ в 1986 и 2017 г.

жинах, расположенных в районе исследуемой территории.

На этапе полевых работ выполнялись маршрутные исследования с изучением полотна дороги, откосов, полосы отвода и склонов. Изучалась глубина сезонного оттаивания на отдельных репрезентативных участках. Во время выполнения работ были тщательно зафиксированы, описаны и сфотографированы все проявления ЭГПЯ на самой дороге, а также на прилегающих к дороге склонах, вдоль которых она проходит.

ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ УЧАСТКА АВТОМОБИЛЬНОЙ ДОРОГИ “УДОКАН–НАМИНГА”

На территории изучаемого района распространены породы нижнего протерозоя, представляющие собой мощный комплекс преимущественно терригенных метаморфизованных образований [3], а также гранитоиды – жильные или интрузивные образования. Широко распространены отложения четвертичного периода, различающиеся как по составу, так и по генезису, формировавшиеся в ледниковое и межледниковое время. На линейном участке дороги преимущественно распространены ледниковые, пролювиальные, десерпционно-солифлюкционные, делювиальные, мерзлотно-болотные и аллювиальные отложения среднего, верхнего неоплейстоцена и голоцена с преобладанием супесчаных, песчаных, валунно-галечниковых и щебнисто-глыбовых фракций [4].

Линейный участок дороги начинается на высоте 800 м над уровнем моря и пересекает пойму и

первую надпойменную террасу р. Левый Нирунгнакан, полого-равнинные, холмисто-западинные участки основной морены сартанского оледенения, аккумулятивные подножья склонов (5° – 10°), среднегорные десерпционные склоны (15° – 30°) с курумовым чехлом поверхностных отложений до высоты 1540 м [2].

Гидрогеологические условия определяются сплошным распространением многолетнемерзлых пород мощностью от 100 до 500 м и разломными зонами между ними [2]. Предполагается, что наличие постоянного поверхностного водотока – р. Левый Нирунгнакан, обуславливает наличие гидрогенного подруслового несквозного талика, приуроченного к изучаемой территории.

Несмотря на небольшое количество поступающих атмосферных осадков, из-за конденсации влаги в курумах и таяния гольцового льда на склонах вдоль дороги, на значительном ее протяжении встречается множество временных водотоков.

Климат района исследования резко континентальный. Годовая сумма осадков составляет в среднем от 200 до 600 мм в соседней Верхнечарской котловине и от 400 до 800 мм в среднегорье хребта Удокан. Лето короткое и нередко дождливое (пасмурное). По данным метеостанции с. Чара, в Верхнечарской котловине средняя температура самого теплого месяца достигает $+16.8^{\circ}\text{C}$ (июль), самого холодного -31.8°C (январь). Холодный период довольно продолжительный и длится около 7–8 мес. Абсолютный температурный минимум равен -56.2°C . Среднегодовая температура воздуха в котловине за период 1939–

2022 гг. составляет -7.5°C . Максимальная годовая амплитуда может достигать 91.2°C (абсолютный максимум $+35^{\circ}\text{C}$), среднемесячных температур 48.6°C . Особенность климата заключается в том, что в межгорных впадинах и котловинах зимой микроклимат более суровый, чем на прилегающих склонах хребта Удокан, а летом, наоборот, более теплый, что свидетельствует об инверсионном характере распределения температуры [1].

Растительность подчинена вертикальной зональности. На территории исследования до 1100 м распространена лиственничная тайга с фрагментарными сосняками (долины рек и склоны гор), где они сменяются кустарничково-лишайниковым лиственничным редколесьем (1100–1300 м). Выше 1300 м склоны гор покрыты стлаником и полярной березкой. На высоте выше 1800 м начинается зона гольцов, где распространены горно-тундровые мхи и лишайники. Распределение растительности зависит от экспозиции, формы и крутизны склонов, а также от глубины сезонного оттаивания (наименьшая глубина оттаивания (до 1 м) на гольцовом поясе, заболоченных участках и склонах северной экспозиции) и возможных таликовых зон [2].

Из экзогенных геологических процессов на территории исследования широкое распространение имеет процесс курумообразования. Если разделять курумы по их формам на каменные поля и каменные потоки (линейные формы развалов на склонах с соотношением длины к ширине 1 : 2), то на изучаемой территории преобладают именно первые. Для них характерно наличие обломков скальных пород изометричной формы с размерами 0.4–0.7 м. Если говорить именно о площади их распространения, то следует отметить, что склон вдоль изучаемого участка дороги на большую часть сложен курумами.

Учитывая проявления встреченных временных потоков, можно судить о вероятном наличии (по свидетельству местных жителей и наблюдающих) в холодное время года на их месте сезонных наледей, размер которых по длине и ширине достигает не более 7 м.

Также в пределах исследуемой территории встречаются сезонные бугры пучения. Их формирование связано с выходом подмерзлотных вод, промерзанием несквозных таликов и деятельного слоя [2]. Наличие торфянистых переувлажненных отложений играет заметную роль в формировании сезонных бугров пучения. На территории исследования были описаны преимущественно торфяные бугры пучения, которые развиваются на заболоченных днищах впадин в пределах высохших озер. Средняя высота бугров пучения достигает 1.5–3 м, а диаметр основания: 10–20 м.

В оторфованных пойменных суглинках и супесях отмечено наличие повторно-жильных

льдов эпигенетического генезиса – результат морозобойного трещинообразования.

На участках, подвергшихся антропогенному воздействию, например, удалению растительного покрова или изменению условий дренажа, возможно развитие таких процессов, как термоэрозия и термокарст. Термокарст развивается по повторно-жильным, конституционным и погребенным подземным льдам и проявляется в виде заболоченных понижений, отдельных провалов (воронок) глубиной до 10–15 м при диаметре от 5 до 40 м.

Таким образом, широкое распространение геокриологических процессов и явлений усложняет процесс эксплуатации автомобильной дороги, при этом особое внимание необходимо уделить именно курумам из-за их преобладания на участках дороги и охлаждающего влияния на среднегодовые температуры окружающих грунтов (результаты получены с помощью термометрических измерений в рамках фонового мониторинга [6]).

ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ ЭКЗОГЕННЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ЯВЛЕНИЙ

Конструкция автомобильной дороги и вызванные ее строительством нарушения природной среды

Автомобильная дорога “Удокан–Наминга” является дорогой муниципального значения. Она представляет собой полотно шириной до 5 м с высотой отсыпки до 1.5 м (рис. 2). Отсыпка состоит из щебенисто-глыбового материала с песчаным заполнителем.

Изменение природной обстановки. Во время строительства автомобильной дороги при планировке поверхности был удален растительный покров, а также изменен состав отложений. На некоторых участках склоны подрезались с нагорной стороны и создавались полувыемки, что в дальнейшем привело к активизации обвально-осыпных и оползневых процессов. Изменились и условия поверхностного и подземного стока. На протяжении всего исследуемого участка было встречено большое количество временных водопоявлений (рис. 3), которые, скорее всего, являются выходами на поверхность надмерзлотных вод, вызывающие размыв и частичное разрушение полотна, а на некоторых участках подтопление и затопление с формированием небольших озер.

Изменение природной обстановки фиксировалось по постепенной трансформации растительных сообществ под действием внешних и внутренних факторов. На первых двух километрах дороги от пос. Удокан изменений не наблюдалось. Однако, начиная с третьего километра,



Рис. 2. Исследуемый участок с иллюстрацией размыва полотна дороги эрозионными процессами (фото Н.А. Гурьянова).



Рис. 3. Выход надмерзлотных вод из-под курумового чехла на десятом километре дороги (фото Н.А. Гурьянова).

подмечены формирование и рост подлеска, который косвенно влияет на температурный режим в породах. Так, наличие подлеска способствует увеличению мощности снежного покрова, который в свою очередь оказывает утепляющее влияние.

Инженерно-геологические процессы и явления, проявившиеся в ходе эксплуатации автомобильной дороги

Помимо вышеперечисленных геокриологических процессов и явлений по ряду признаков можно предположить распространение сезонных наледей вдоль дороги. Непосредственно во время проведения полевых работ наледей не было замечено, так как они к этому времени растаяли, а геологические следы их деятельности выражены слабо. Тем не менее выделено несколько мест, где

предположительно могут формироваться наледи надмерзлотных вод малой мощности и размеров. Одним из таких мест является руч. Любви (6-й км от пос. Удокан) с измеренным дебитом 0.15 л/с, который, по свидетельствам местных жителей, уже давно пересекает дорогу в этом месте.

В полосе автодороги получили распространение и гравитационные процессы: осыпания, отседания, обрушения, микрооползни, оползания отдельных крупных глыб. Так, например, довольно часто встречающиеся микрооползни непосредственно выходят на полотно дороги в виде язычков, имеющих небольшие размеры: в ширину до 3 м, а в длину до 5 м.

На многих участках дороги развивается эрозия и, как следствие, формирование эрозионных промоин. Это явление наносит большой вред полотну автодороги и, как следствие, является при-



Рис. 4. Оползень-спыв (слева), сошедший на дорогу (фото из отчета 1986 г.), и современный облик участка (справа) оползня-спыва (фото Д.О. Сергеева, 2017 г.)

чиной проведения ее постоянного ремонта. Для некоторых участков дороги характерен размыв полотна поверхностными водами. Промойны имеют глубину вреза порядка 20–30 см, ширину до 1 м. Чаще всего они ориентированы субпараллельно полотну дороги. В данном случае глубина размыва определяется составом грунта. Чем больше количество грубообломочного материала, который поток воды не может унести из-за недостатка энергии, тем более устойчив грунт к размыву.

Вдоль участка автодороги на склоне возможно формирование оползней-спывов. Так, в 1986 г. был отмечен большой оползень-спыв (рис. 4, слева), чей след на склоне остается до сих пор (рис. 4, справа).

ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЯ КОЛИЧЕСТВА И ХАРАКТЕРА ПРОЦЕССОВ И ЯВЛЕНИЙ ЗА ПЕРИОД 1986–2017 гг.

Для оценки и анализа характера развития ЭГПЯ на дороге за период последних 30 лет в сравнении с полевым обследованием 2017 г. был выполнен по-пикетный подсчет встречаемости экзогенных геологических образований, представленный в табл. 1, в которой указано количество проявлений основных ЭГП на погонный километр трассы. Это проявления осыпания пород (осыпные конуса размером до 4 м), отседания и обрушения (обвальные глыбовые образования объемом до 5 м³), микрооползни с глубиной захвата 0.5–1.5 м и объемом до 10 м³, выходы надмерзлотных вод и подтопление участков дороги, участки наледеобразования, размывы полотна дороги и др.

Сравнение данных 2017 г. с результатами, полученными в 1986 г., показывает, что характер

процессов и явлений, а также их количество за оцениваемый период изменились незначительно. Но все же, некоторые отличия видны, особенно, если посмотреть на общее количество проявлений различных процессов и явлений в разные годы исследований. Такое распределение может указывать на то, что природно-техническая система начала постепенно приходить в равновесие. По этим данным можно разделить участки автодороги по состоянию земляного полотна на устойчивые (ЭГПЯ не развиваются), относительно устойчивые (ЭГПЯ незначительно активны) и неустойчивые (ЭГПЯ активны и приводят к быстрому нарушению полотна).

Большое значение для характеристики особенностей развития ЭГПЯ имеет установление причин их динамики. Принимая во внимание, что комплекс геокриологических процессов (и ЭГПЯ в целом) определяется особенностями геокриологической обстановки, были выделены типы геокриологической обстановки (ТГО) и соответствующие им комплексы инженерно-геологических процессов и явлений.

По признакам: состав грунтовых толщ, характер распространения многолетнемерзлых пород, их мощность, среднегодовая температура, льдистость и особенности сезонного оттаивания, было выделено 6 типов геокриологической обстановки (табл. 2), различающиеся, в том числе, и набором присущих им экзогенных геологических процессов и явлений.

Для ТГО “А” характерны высокие среднегодовые температуры и повышенная влажность пород. Наряду с малым уклоном поверхности обстановка способствует образованию сезонного пучения и мелких термокарстовых форм.

Таблица 1. Количество проявлений экзогенных геологических процессов и явлений на 1 км автомобильной дороги “Удокан–Наминга” в 1986 и 2017 г.

Экзогенные геологические процессы и явления	1986 г. (количество ЭГПЯ в ед.)										
	0–1 км	1–2 км	2–3 км	3–4 км	4–5 км	5–6 км	6–7 км	7–8 км	8–9 км	9–10 км	10–11 км
Осыпание	1			3				2	4	1	
Отседание, обрушение			1	1			1				
Микрооползни			1	2					1		
Оползание отдельных крупных глыб							2	1		1	1
Временное водопроявление	4	2	12	5	1			5	2	2	7
Наледеобразование											
Концентрированный вынос мелкозема	1	4	1	1	2	4	2	1	2		
Размыв полотна дороги	1	1	6	2	1	1		2	1		1
Суффозионная воронка											
Всего	7	7	21	14	4	5	5	11	10	4	9
2017 г.											
Осыпание	1			2							
Отседание, обрушение											
Микрооползни			2	2							1
Оползание отдельных крупных глыб							3	2		2	1
Временное водопроявление							2	1			5
Наледеобразование											1
Концентрированный вынос мелкозема	2	4	2	1	2	3	2	1	1		
Размыв полотна дороги		1	3	2	1	1	2	3		2	3
Суффозионная воронка										1	2
Всего	3	5	7	7	3	4	9	7	3	5	13

ТГО “Б” расположен на пролювиальных конусах выноса с активным водным подповерхностным стоком в валунно-галечниковой толще и суффозионным выносом песчаных пород из-под нее. Нарушения водного стока под поверхностью вызывают водопроявления и размыв полотна дороги на дневной поверхности, а также способствуют образованию мелких наледей на плоской поверхности дороги.

Щебнисто-глыбовый грубообломочный характер курумного чехла ТГО “В” создает предпосылки гольцовому льдообразованию в курумах и развитию криогенной десерпции.

Для ТГО “Г” характерны пылеватый заполнитель в щебнисто-глыбовом грубообломочном материале и широкий диапазон в среднегодовых температурах пород, способствующие развитию морозобойного растрескивания грунтов и фор-

мированию сортированных полос с пятнами-медальонами на поверхности.

Разноразмерный грунтовый материал ледникового генезиса ТГО “Д” и относительно невысокие среднегодовые температуры грунтов способствуют развитию криогенной сортировки обломочного материала на поверхности.

Полигенетический характер отложений ТГО “Е” зависит от отсутствия или присутствия заполнителя в щебнисто-глыбовом чехле отложения и создает предпосылки для развития криогенной десерпции грубообломочного материала с суффозионным выносом остаточного мелкозема или формированию сортированных полос на поверхности.

Нарушение поверхности ТГО “В”, “Г”, “Д” и “Е” в виде снятия растительного покрова, выравнивания поверхности и подрезки склонов приво-

Таблица 2. Основные типы геокриологических обстановок в районе автомобильной дороги “Удокан–Наминга”

Индекс ТГО	Тип грунтовой толщи		Геокриологическая характеристика				
	Генезис	Состав	Характеристика распространения многолетнемерзлых пород (ММП)	Мощность ММП, м	Средние годовые температуры, °С	Криогенные текстуры и льдистость, д.с.	Мощность СТС, м
А	Современный аллювиальный	Галечники с валунами и гравийно-песчаным заполнителем	островное	100–150	+0.5 до –2	отсутствует	0.5–2.5
Б	Современный пролювиальный	Валунно-галечниковая толща с пылеватым заполнителем	прерывистое	350–400	–1 до –3	От массивной до массивно-корковой 0.1–0.3	3.0–3.5
В	Современный десерпционный	Щебнисто-глыбовый	сплошное	До 500	–4 до –6	Корковая, базальная, базальный лед 0.2–0.3	0.5–0.6
Г	Современный делювиальный	Глыбово-щебнистая толща с пылеватым заполнителем	сплошное	300–400	от –1 до –5	Массивно-корковая 0.01–0.2	0.8–2.0
Д	Средне-неолейстоценовый ледниковый	Галечники с валунами и гравийно-песчаным заполнителем	сплошное	400–500	от –1 до –4	От массивной до массивно-корковой 0.01–0.1	0.8–2.0
Е	Современный полигенетический (элювиально-делювиальный, десерпционно-делювиальный)	Глыбово-щебнистая толща с или без заполнителя	сплошное	350–450	от –1 до –6	Массивная, массивно-корковая, линзовидно-слоистая и линзовидно-сетчатая 0.1–0.2	от 0.8–2.0 до 3.0–3.5

Таблица 3. Сравнение основных типов геокриологических обстановок и ЭГПЯ на автомобильной дороге “Удо-кан–Наминга” под воздействием строительства и эксплуатации

Индекс ТГО	Нарушения природной обстановки	ЭГПЯ до строительства	ЭГПЯ после строительства, 1986 г.	ЭГПЯ после 30 лет эксплуатации
А	Нет	Сезонное пучение (миграционное и инъекционное), образование мелких термокарстовых форм	Сезонное пучение (миграционное и инъекционное), образование мелких термокарстовых форм	Сезонное пучение (миграционное и инъекционное), образование мелких термокарстовых форм
Б	Снятие наземного (растительного) покрова	Суффозия	Временные водопроявления, размывы полотна дороги, сезонные наледи, осыпные процессы	Временные водопроявления, размывы полотна дороги, сезонные наледи, осыпные процессы
В	Планировка поверхности, снятие растительного покрова, подрезка склонов	Курумы, гольцовое льдообразование, десерпция, суффозия	Осыпные процессы, отседание, обрушение, отседание отдельных глыб, суффозия	Осыпные процессы, отседание, обрушение, отседание отдельных глыб, суффозия, временные водопроявления, размывы полотна дороги
Г	Те же	Морозобойное растрескивание, морозная сортировка обломочного материала и формирование пятен-медальонов	Осыпные процессы, отседание отдельных глыб, вынос мелкозема, размыв полотна дороги	Осыпные процессы, отседание отдельных глыб, вынос мелкозема, размыв полотна дороги, оползания отдельных глыб, временные водопроявления
Д	– “ –	Морозная сортировка обломочного материала	Те же	Те же
Е	– “ –	Морозобойное растрескивание, морозная сортировка обломочного материала, суффозия, десерпция	– “ –	– “ –

дит к гравитационно-склоновым (обрушения, осыпи, отседания отдельных глыб) процессам, а также к таянию грунтового льда, выносу мелкозема с поверхности и суффозионным формам рельефа (воронкам), водопроявлению и размыву полотна дороги.

Анализ табл. 3 показывает, что геокриологическая обстановка типа А не изменилась благодаря отсутствию техногенных нарушений природной обстановки. В типах Б, В и Г произошла активизация гравитационных склоновых процессов (осыпей, отседания отдельных глыб, обрушения и др.) из-за подрезки склонов при строительстве дороги. С другой стороны, в этих же типах участились выходы надмерзлотных вод, которые являются одной из причин размыва полотна дороги. Таким образом, участки автодороги, которые проходят вдоль подрезанных курумовых склонов, подверглись наибольшему деформациям.

Для предотвращения дальнейшего разрушения автодороги необходимо провести мероприя-

тия по ее защите. Например, восстановить водоотводные каналы и дренажи, что позволит отвести надмерзлотные воды от полотна дороги. А для обеспечения защиты от гравитационных процессов на склонах необходимо провести их укрепление. Для оценки динамики ЭГПЯ в различных типах геокриологических обстановок необходимо проводить режимные наблюдения, включающие бурение скважин во всех ТГО, измерение годового хода температур в этих скважинах и мониторинг проявлений процессов и явлений на склонах и полотне автодороги.

Сравнительный анализ табл. 1 и 3 показывает, что на исследуемой автодороге количество ЭГПЯ уменьшилось, а направленность их развития в некоторых ТГО изменилась из-за нарушения природной обстановки. Наиболее активные и часто встречающиеся процессы – концентрированный вынос мелкозема и временные водопроявления. Причем второй является более опасным, так как ведет к размыву полотна. В основном это над-

мерзлотные воды, формирующиеся из-за таяния внутригрунтового льда и конденсации влаги в десерпционном чехле. Гравитационные процессы и явления встречаются в основном на участках, где произошла подрезка склона, вызвавшая их активизацию. Однако следует отметить, что, например, размыв полотна дороги встречается на участках, не отмеченных на карте 1986 г., что указывает на изменение мест выхода и траектории движения временных потоков.

Рекомендации по мониторингу ЭГПЯ на автодороге сводятся к пониманию взаимодействия компонентов природно-технической системы (дорожная насыпь, земляное полотно), геологической среды (грунты основания), гидрометеорологических процессов и явлений (колебания температуры воздуха, осадков, поверхностного и подземного стока) и включают:

– первичные рекогносцировочные полевые и дистанционные обследования автодороги на предмет выявления имеющихся ЭГПЯ (их размеров, количества, степени влияния на инженерное сооружение);

– типизация территории и выделение основных типов геокриологической обстановки с зафиксированным временным и пространственным соотношением ЭГПЯ;

– получение более конкретной информации о строении и свойствах горных пород с помощью проходки инженерно-геокриологических скважин, отбора и определения физико-механических свойств грунтов в лабораторных условиях;

– обеспечение скважин и метеорологических стационарных постов термометрическими и влажностными датчиками для наблюдений за состоянием и динамикой температурного и водного режима грунтов под дорогой и меняющимися водно-климатическими условиями поверхностных вод и приземной атмосферы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследования получено представление о современной геокриологической обстановке, что послужило основой для ее типизации на различных участках автомобильной дороги “Удокан–Наминга”. Особенности геокриологической обстановки района исследования заключаются в преимущественно сплошном распространении многолетнемерзлых пород, имеющих мощность от 100 до 500 м. Формирование таликов возможно на водоразделах (радиационно-тепловой характер), а также под руслами рек и озерами (гидрогенный характер).

Изучены ЭГПЯ до строительства автомобильной дороги, характер их развития после строительства и после 30 лет эксплуатации. Из анализа полученных данных можно сделать вывод, что

наибольшей деформации подверглись участки дороги, которые проходят вдоль склонов с десерпционным чехлом. На участках дороги, проходящих через данный тип геокриологической обстановки, требуются ремонт полотна, а также проведение мероприятий по его защите.

Для анализа динамики геокриологической обстановки необходимо установить режимные наблюдения, которые должны включать в себя уточнение границ ТГО, а также изменений характеристик внутри них. Для исследования динамики ведущих экзогенных геологических процессов надо изучить их проявления, вызывающие деформации земляного полотна (описание места, частота, объемы и размеры), и выполнить сравнение с данными прошлых лет.

Авторы признательны А.С. Войтенко и Н.А. Гурьянову за помощь в проведении полевых исследований и обработке полученных материалов, использованных при написании данной научной статьи.

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. Геокриологические условия Забайкалья и Прибайкалья / Н.А. Некрасов (ред.). М: Наука, 1967. 228 с.
2. Геокриология СССР: Горные страны юга СССР / Э.Д. Ершов (ред.). М: Недра, 1989. 360 с.
3. *Зиновьев Ю.И.* Геохимические особенности сакуканских отложений и медных руд Удокана // Горный информационно-аналитический бюллетень. Отд. вып. № 3. Забайкалье. 2009. С. 63–68.
4. Инженерно-геологические условия развития экзогенных геологических процессов на территории северного Забайкалья в зоне БАМ / Под ред. В.В. Малыгина. Чита: ЧГУ, 1986. 212 с.
5. *Мурашов К.Ю., Волков А.В., Платэ А.Н., Петров В.А.* Оценка геолого-экономических факторов развития северного Забайкалья с использованием геоинформационных технологий // Мониторинг науки и технологии. 2019. № 1 (39). С. 36–42.
6. *Сергеев Д.О., Станиловская Ю.В., Перльштейн Г.З., Романовский В.Е. и др.* Фоновый геокриологический мониторинг в Северном Забайкалье // Криосфера Земли. 2016. Т. 20. № 3. С. 24–32.

DEVELOPMENT OF EXOGENOUS GEOLOGICAL PROCESSES AND PHENOMENA ON THE UDOKAN – NAMINGA HIGHWAY (THE NORTHERN TRANSBAIKALIA)

A. P. Kulakov^{a,#} and D. O. Sergeev^{a,##}

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

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

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

The paper considers exogenous geological processes and phenomena on the Udokan–Naminga highway in 2017, which are compared with the previous results obtained by the expedition of the Lomonosov Moscow State University in 1986. The engineering geological conditions and manifestation specifics of these processes and phenomena are analyzed. The geocryological conditions and the relevant combinations of engineering geological processes and phenomena were typified according to various geological features. As proceeds from the comparison of the results for different years, the type and number of exogenous geological processes and phenomena have not changed much. The concentrated transport of fine earth and temporary water runoff flows on roads appear to be the most active and frequently occurring processes. The most deformed sections of the road were those that run along the cut slopes with stone streams (kurums). The results of the study show that special attention should be paid to stone streams because of their wide distribution along the road and their cooling effect on the average annual temperatures of the surrounding soils and rocks.

Keywords: *Udokan–Naminga highway, mountain cryolithozone, assessment of condition and dynamics, Udokan ridge, Northern Transbaikalia, exogenous geological processes and phenomena*

REFERENCES

1. Geocryological conditions of Transbaikalia and the Baikal region], Nekrasov, N.A., Ed., Moscow, Nauka Publ., 1967, 228 p. (in Russian)
2. Geocryology of the USSR: Mountain countries in the south of the USSR], Ershov, E.D., Ed., Moscow, Nedra Publ., 1989, 360 p. (in Russian)
3. Zinoviev, Yu.I. [Geochemical features of Sakukan deposits and copper ores of Udokan]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten*, 2009, no. 3, pp. 63–68. (in Russian)
4. Engineering geological conditions for the development of exogenous geological processes in the northern Transbaikalia, the BAM zone], Malygin, V.V., Ed., Chita, ChGU Publ., 1986, 212 p. (in Russian)
5. Murashov, K.Yu., Volkov, A.V., Plate, A.N., Petrov, V.A. [Assessment of geological and economic factors of the development of the Northern Transbaikalia using geoinformation technologies]. *Monitoring nauka i tekhnologii*, 2019, no. 1 (39), pp. 36–42. (in Russian)
6. Sergeev D.O., Stanilovskaya Yu.V., Perlstein G.Z., Romanovsky V.E., et al. [Background geocryological monitoring in the Northern Transbaikalia]. *Cryosphere of the Earth*, 2016, vol. 20, no. 3, pp. 24–32. (in Russian)

УДК 624.131.439

ПАРАМЕТРЫ ДИНАМИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ И МЕТОДИКА ИХ ОПРЕДЕЛЕНИЯ

© 2023 г. Е. А. Сенцова^{1,*}, М. С. Никитин^{1,**}, Е. А. Вознесенский^{1,2,***}

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

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

*E-mail: sentsovaea@gmail.com

**E-mail: mikes.nikitin@gmail.com

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

Поступила в редакцию 05.05.2023 г.

После доработки 07.06.2023 г.

Принята к публикации 09.06.2023 г.

Корректное определение прочностных свойств актуально для прогноза механического поведения грунтов и их массивов. Этот вопрос широко освещен в научной литературе в статической постановке задачи, однако определение прочностных свойств при динамическом нагружении остается дискуссионным. На основе совместного анализа данных статических и динамических трехосных испытаний в статье приводится разработанный авторами новый методический подход к определению параметров динамической сдвиговой прочности водонасыщенных образцов глинистых грунтов. Показано, что при прочих равных условиях величина угла внутреннего трения образцов глинистого грунта с преимущественно коагуляционной структурой в статических и динамических условиях одинакова, однако при динамическом нагружении сцепление снижается.

Ключевые слова: лабораторные испытания, динамические трехосные испытания, прочность грунтов, тиксотропия

DOI: 10.31857/S0869780923040082, **EDN:** YIGRGW

ВВЕДЕНИЕ

Влияние динамического режима нагружения на изменение прочности и параметров прочности дисперсных грунтов волнует как отдельных ученых, так и целые научные коллективы, начиная со второй половины XX в.

Изменение прочностных характеристик глинистых грунтов под действием вибрационных и динамических нагрузок в России начали исследовать, главным образом, с позиций изучения тиксотропных свойств грунтов несколько позже, чем песчаных.

Результаты исследований, посвященных обозначенной тематике, представлены в работах М.В. Аверочкиной [1, 2], Ю.А. Велли [3], Е.А. Вознесенского [4], Е.Н. Ермолаева [8], Г.Н. Жинкина [9, 10], Л.П. Зарубиной [11], К. Ишихары [25–27], К. Касуды [25], А.И. Кистанова [12], В.Н. Кутергина [13, 14], А.И. Лагойского [15], Р. Мано [26], А.А. Мусаэяна [16], А. Нагао [26], Н.А. Преображенской [17, 18], И.В. Прокудина [19], П.А. Ребиндера [20], И.А. Савченко [21],

В.А. Соколова [22], Ю.Г. Трофименкова [23], В.М. Тубольцева [24], А.Н. Шаниной [24].

Несмотря на то что в большинстве работ зафиксировано и описано явление снижения прочностных характеристик глинистых грунтов, воспринимающих вибрационные, динамические и вибродинамические нагрузки, в научном сообществе существуют различные точки зрения на природу этого эффекта, в том числе на количественную оценку динамических параметров прочностных свойств грунтов.

Цель данной работы – изучение закономерностей изменения сдвиговой прочности и параметров прочности глинистых грунтов в условиях динамического нагружения, а также разработка методики их экспериментального определения.

ХАРАКТЕРИСТИКА ИССЛЕДОВАННЫХ ГРУНТОВ

Для разработки методики определения сдвиговой прочности глинистых грунтов были проведены лабораторные эксперименты на модельных

Таблица 1. Характеристика исследуемых грунтов

Естественная влажность, (%)	Плотность грунта, (г/см ³)	Плотность скелета грунта, (г/см ³)	Плотность частиц грунта, (г/см ³)	Коэффициент пористости	Степень влажности, (д.е.)	Верхний предел пластичности, (%)	Нижний предел пластичности, (%)	Число пластичности, (%)	Показатель текучести
W	ρ	ρ_d	ρ_s	e	S_r	W_L	W_P	I_P	I_L
Модельные глинистые грунты (из глин J ₃₀ х, морского генезиса, район г. Обнинск Калужской области)									
59–61	1.59–1.63	0.99–1.02	2.67	1.61–1.70	0.95–0.99	74	48	26	0.43–0.50
60	1.61	1.01		1.65	0.97				0.46
Голоценовые глинистые грунты морского генезиса (северо-восточная часть Баренцева моря)									
80–87	1.47–1.55	0.78–0.86	2.64	2.06–2.31	0.94–1.00	91	38	53	0.77–0.92
83	1.51	0.83		2.19	0.97				0.84

образцах, изготовленных из верхнеюрских глин оксфордского яруса при заданной плотности и влажности. Модельный глинистый грунт с заданными свойствами использовался, чтобы исключить влияние разброса указанных показателей на величину определяемой прочности. По классификации ГОСТ 25100-2020 [6] грунт отнесен к глине легкой пылевой тугопластичной. Плотность модельных образцов варьировала в диапазоне от 1.59 до 1.63 г/см³, влажность – в диапазоне от 58 до 61%.

Также была проведена серия испытаний на голоценовом глинистом грунте естественного сложения морского генезиса (северо-восточная часть Баренцева моря). По классификации ГОСТ 25100-2020 [6] грунт отнесен к глине тяжелой текучепластичной. Естественная влажность образцов грунта составляет 79–87%, плотность 1.47–1.55 г/см³.

Характеристики исследуемых грунтов представлены в табл. 1.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Экспериментальная часть исследования включала в себя ряд необходимых определений показателей состава и свойств изучаемых глинистых грунтов и проведение лабораторных статических и динамических испытаний в условиях трехосного сжатия. Исследования выполнены на кафедре инженерной и экологической геологии геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

Лабораторные эксперименты выполнены на приборах: статического/динамического трехосного сжатия “MINIDYN 2 Hz 10 kN” (GDS, Великобритания), статического и динамического трехосного сжатия (ООО “НПП ГЕОТЕК”, Россия).

Трехосные испытания проводились в несколько этапов: подготовка образца, контроль степени водонасыщения, консолидация, статическое или динамическое нагружение и обработка полученных результатов.

Подготовка образцов грунта для статических и динамических трехосных испытаний

В рамках данного исследования были использованы грунты естественного сложения и модельные образцы с заданной влажностью и плотностью.

Модельные образцы были изготовлены согласно ГОСТ 30416-2020 [7]. Исходный грунт высушивался в сушильном шкафу, растирался пестиком с резиновым наконечником, просеивался через сито с отверстиями диаметром 5 мм и затем замачивался на два часа. Для создания заданной влажности в грунт добавлялось расчетное количество воды Q_p [см³], определяемое по формуле (1):

$$Q_p = \frac{m_T(W_3 - W)}{\rho_w(1 + W)}, \quad (1)$$

где m_T [г] – масса исследуемого грунта при влажности W_3 и W [%] – соответственно заданная и исходная влажности грунта, д.е.; ρ_w – плотность воды, принятая равной 1 г/см³.

Подготовленный грунт послойно закладывался в обойму диаметром 8 см и высотой 16 см консолидометра конструкции ООО “НПП Геотек”. Камера прибора наполнялась водой до верхнего края обоймы, в оставшейся части камеры создавалось разрежение. С помощью вертикального поршня к грунту прикладывалась нагрузка в 100 кПа, уплотнение модельного грунта проводилось в течение двух суток.

Далее из модельного грунта или грунта естественного сложения с помощью специальных ножей и струн на поворотном столике-шаблоне вырезались образцы. Для выравнивания торцов использовались разъемные формы, позволяющие ровно подрезать жестким ножом образец, который затем устанавливался в латексной мембране в камеру трехосного сжатия, закрепляясь на торцах накладными резиновыми кольцами.

Проведение испытаний

Статические и динамические трехосные испытания проводились по консолидированно-недренированной схеме.

После подготовки образца и заполнения камеры прибора рабочей жидкостью был проведен контроль степени водонасыщения по параметру Скемптона (B):

$$B = \frac{\Delta U_i}{\Delta \sigma'_m}, \quad (2)$$

где ΔU_i – приращение порового давления в образце грунта, $\Delta \sigma'_m$ – приращение полного среднего напряжения.

Для проверки коэффициента Скемптона на камере трехосного сжатия перекрывался дренаж системы, затем производилось ступенчатое поднятие полного всестороннего напряжения (σ_3) до величины напряжений, заданных условием эксперимента. В процессе обжатия на каждой ступени проводились измерение и фиксация порового давления (U). Критерием стабилизации порового давления на ступени считалось достижение разницы показаний между двумя его измерениями не более 3 кПа за 15 мин. Далее по формуле (2) производился расчет параметра Скемптона. При достижении напряжения, заданного условием эксперимента, дренаж перекрывался.

После этой стадии эксперимента следовала стадия *изотропной консолидации* образца при открытом дренаже при напряжениях, заданных условиями эксперимента. Критерием окончания консолидации было принято условие изменения объема отжатой жидкости не более чем на 5 мм³ за 5 мин. При его достижении дренаж перекрывался, и осуществлялся переход на стадию статического либо динамического нагружения.

Серия *статических трехосных испытаний* проводилась со скоростью деформации 0.02 мм/мин. Нагружение проводилось до достижения 20% осевой деформации (ϵ_1).

Серия *динамических трехосных испытаний* была выполнена при разных всесторонних напряжениях с разными амплитудами динамических осевых напряжений (σ_d). Авторы при этом исходили из предположения о том, что уменьшение прочности грун-

тов происходит за счет изменения напряженно-деформированного состояния. Так как соотношение всесторонних напряжений и амплитуды динамического воздействия влияет на мобилизуемую прочность грунта, их величины подбирались таким образом, чтобы формирующаяся выборка результатов позволяла бы как можно более полно охарактеризовать изменение прочности в широком диапазоне нагрузок. Частота нагружения во всех экспериментах составляла 0.1 Гц. Динамическая нагрузка прикладывалась до достижения более 15% осевой деформации.

По результатам каждого испытания вычислялся набор параметров, необходимый для анализа и интерпретации поведения грунта: высота, площадь и объем образца грунта после консолидации, относительная вертикальная деформация, скорректированная площадь и величина осевого напряжения образца грунта на этапе девиаторного нагружения. Обработка полученных результатов испытаний проводилась в рамках теории прочности Кулона–Мора и анализа траекторий эффективных напряжений $p'-q$.

Траектории эффективных напряжений были построены в координатах “второй инвариант девиатора напряжений при осесимметричном трехосном сжатии (далее по тексту “девиатор”) – q , среднее эффективное напряжение – p' ”, рассчитанных по формулам (3)–(4):

$$q = (\sigma_1 - \sigma_3), \quad (3)$$

$$p' = \frac{(\sigma'_1 + 2\sigma'_3)}{3}. \quad (4)$$

Параметры прочности определялись расчетом в соответствии с положениями ГОСТ 12248.3–2020 [5].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для разработки единого подхода к определению сдвиговой прочности глинистого грунта в лабораторных условиях испытания проводились на модельных образцах с заданной влажностью и плотностью. В серии статических трехосных испытаний напряженное состояние в момент разрушения определялось по результатам каждого опыта по диаграмме девиатор (q) – осевая деформация (ϵ_1) при максимальном значении девиатора напряжений (рис. 1). Для дальнейшей интерпретации напряженное состояние в момент разрушения идентифицировано на траекториях эффективных напряжений $p'-q$ (рис. 2), отражающих развитие напряжений в образцах на стадии сдвига.

Однозначная идентификация напряженного состояния в момент разрушения при интерпретации результатов динамических трехосных испытаний была затруднена, поскольку во всех прове-

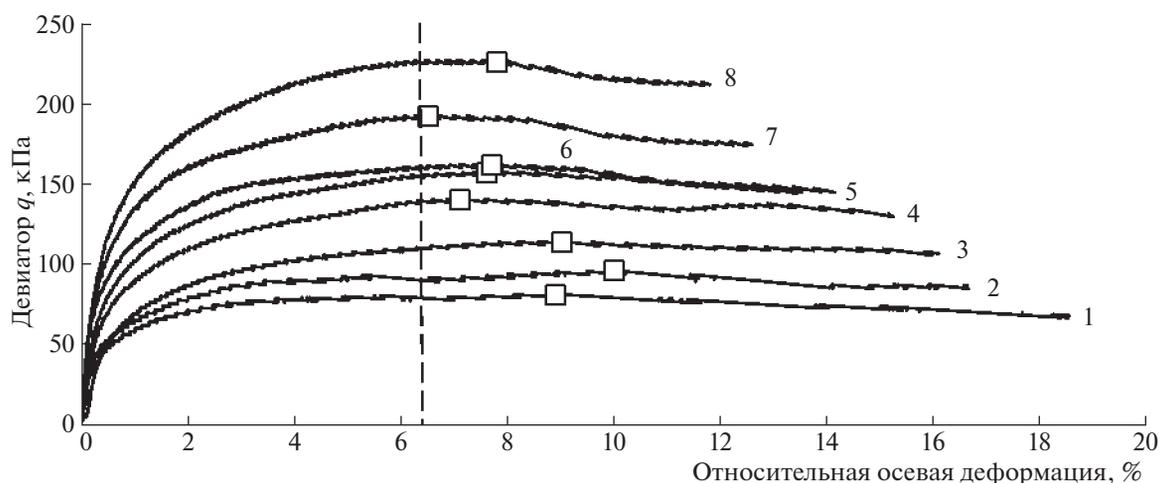


Рис. 1. Зависимость девиатора от относительной осевой деформации для серии статических трехосных испытаний на модельных образцах глины легкой пылеватой тугопластичной: 1 – $\sigma_3 = 50$ кПа, 2 – $\sigma_3 = 100$ кПа, 3 – $\sigma_3 = 150$ кПа, 4 – $\sigma_3 = 200$ кПа, 5 – $\sigma_3 = 250$ кПа, 6 – $\sigma_3 = 300$ кПа, 7 – $\sigma_3 = 350$ кПа, 8 – $\sigma_3 = 400$ кПа.

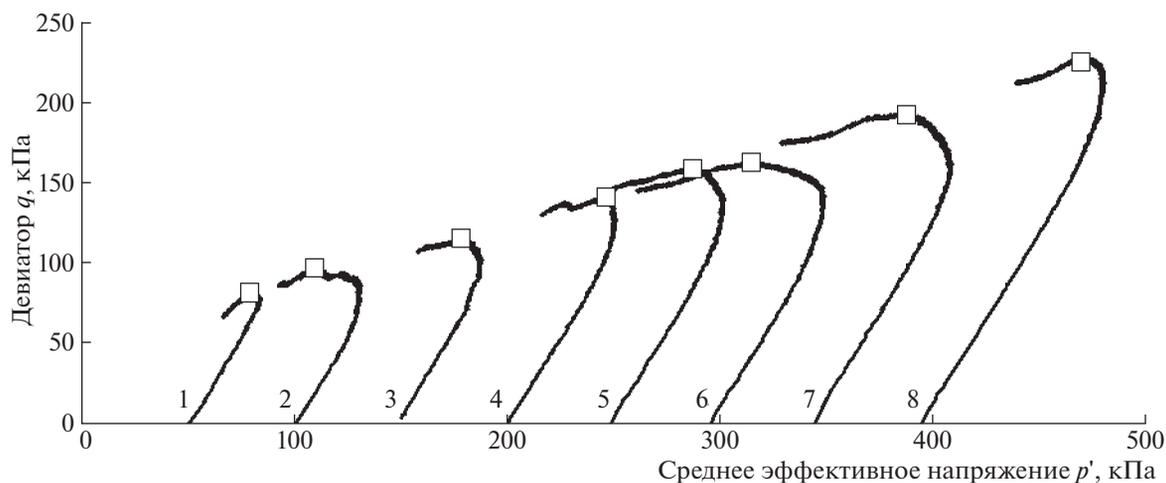


Рис. 2. Траектории эффективных напряжений для серии статических трехосных испытаний на модельных образцах глины легкой пылеватой тугопластичной: 1 – $\sigma_3 = 50$ кПа, 2 – $\sigma_3 = 100$ кПа, 3 – $\sigma_3 = 150$ кПа, 4 – $\sigma_3 = 200$ кПа, 5 – $\sigma_3 = 250$ кПа, 6 – $\sigma_3 = 300$ кПа, 7 – $\sigma_3 = 350$ кПа, 8 – $\sigma_3 = 400$ кПа.

денных испытаниях наблюдалась характерная постепенная деформация формы образца грунта. Типичный пример полученных результатов приведен на рис. 3.

С целью поиска критерия разрушения, который может быть использован при интерпретации результатов динамических испытаний глинистых грунтов, были проанализированы тренды накопления порового давления (рис. 4), осевой деформации (рис. 5) и удельной рассеянной энергии (рис. 6). Отчетливых изменений, указывающих на момент разрушения образцов, на полученных графиках не было выявлено. Поэтому предложено фиксировать напряженное состояние в момент разрушения глинистых грунтов на траектории эффек-

тивных напряжений как пиковое значение девиатора при соответствующем ему среднем эффективном напряжении, при котором уровень осевой деформации соответствует среднему предельному значению, полученному при разрушении этого же грунта в серии статических трехосных испытаний.

Перенос критерия разрушения по уровню накопленной осевой деформации при разрушении из статических трехосных испытаний на динамические вполне правомерен, поскольку уровень критического смещения структурных элементов образца исследуемого грунта не зависит от вида прикладываемой нагрузки. В целом аналогичный по смыслу подход регламентируется и в

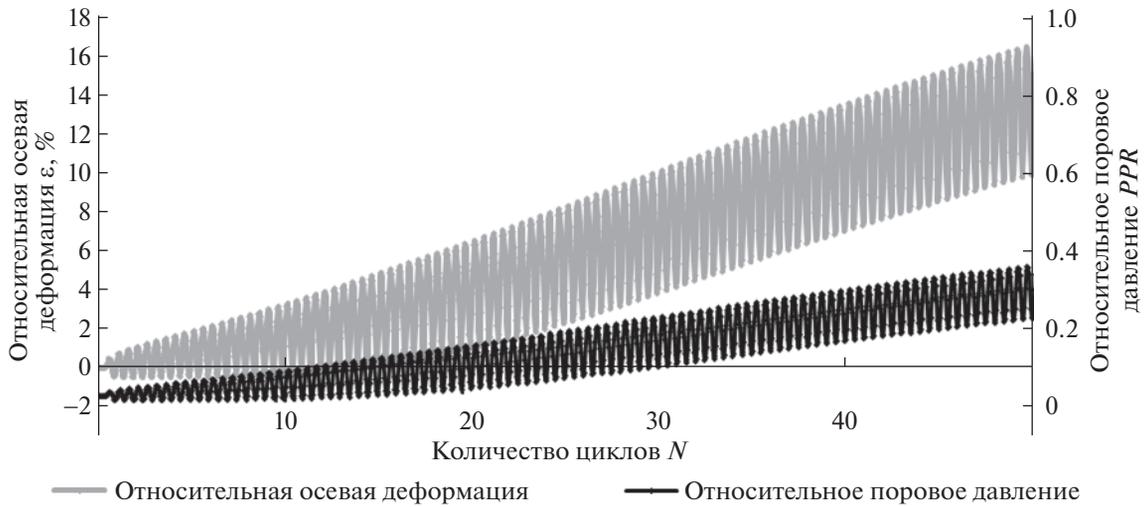


Рис. 3. Относительные осевая деформация и поровое давление при динамическом нагружении модельного образца глины легкой пылеватой тугопластичной при динамическом нагружении ($\sigma_3 = 50$ кПа, $\sigma_d = 38$ кПа).

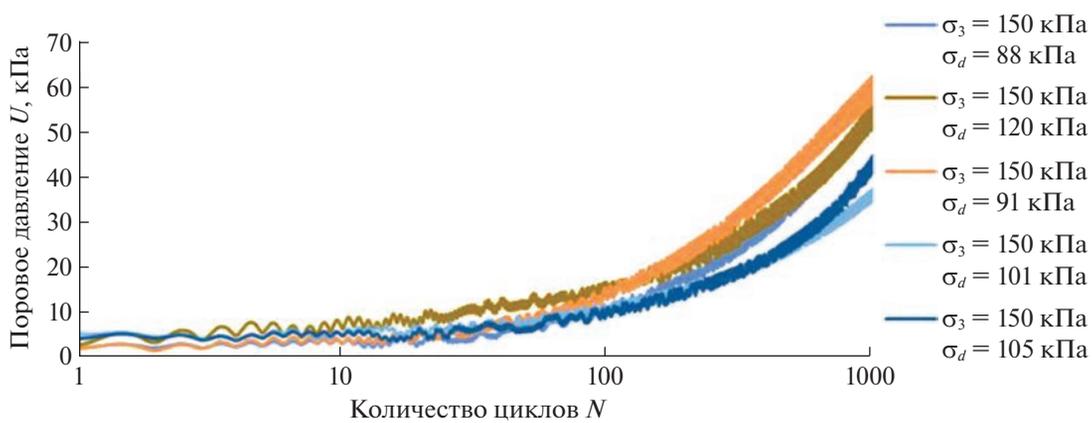


Рис. 4. Зависимость порового давления от количества циклов нагружения для серии динамических трехосных испытаний на модельных образцах глины легкой пылеватой тугопластичной.

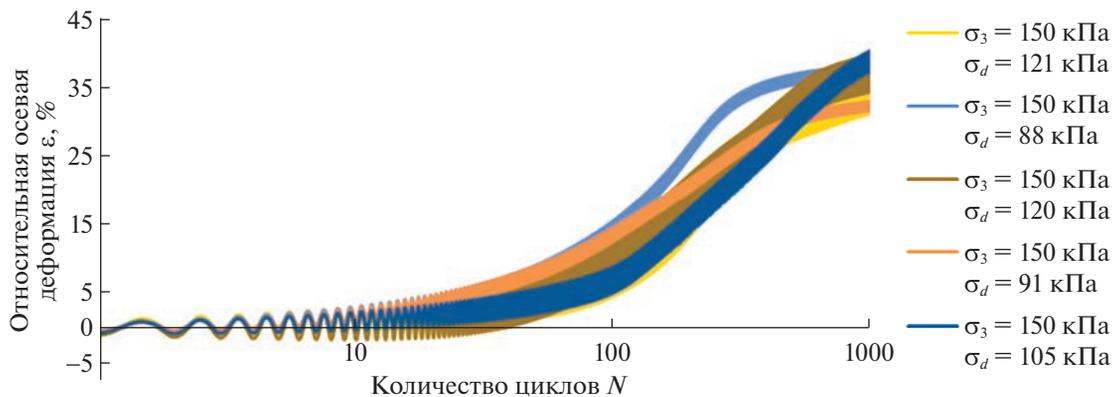


Рис. 5. Зависимость осевой деформации от количества циклов нагружения для серии динамических трехосных испытаний на модельных образцах глины легкой пылеватой тугопластичной.

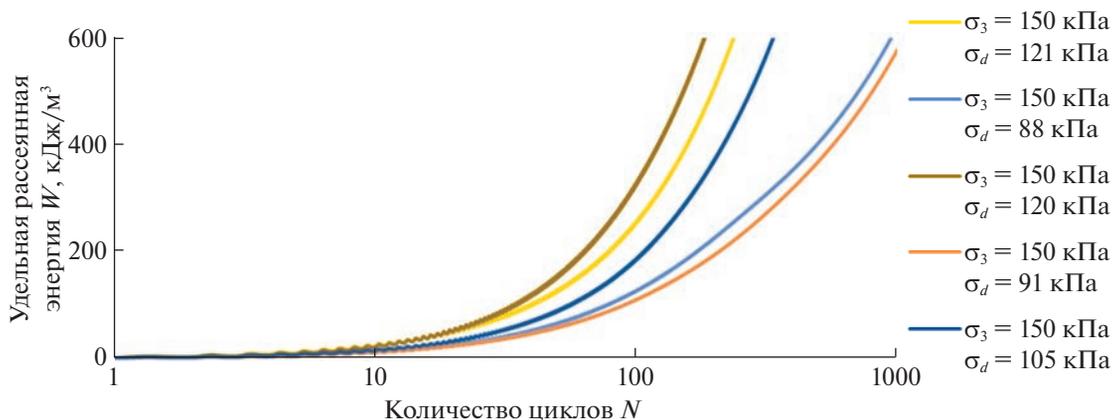


Рис. 6. Накопление удельной рассеянной энергии в функции числа циклов нагружения для серии динамических трехосных испытаний на модельных образцах глины легкой пылеватой тугопластичной.

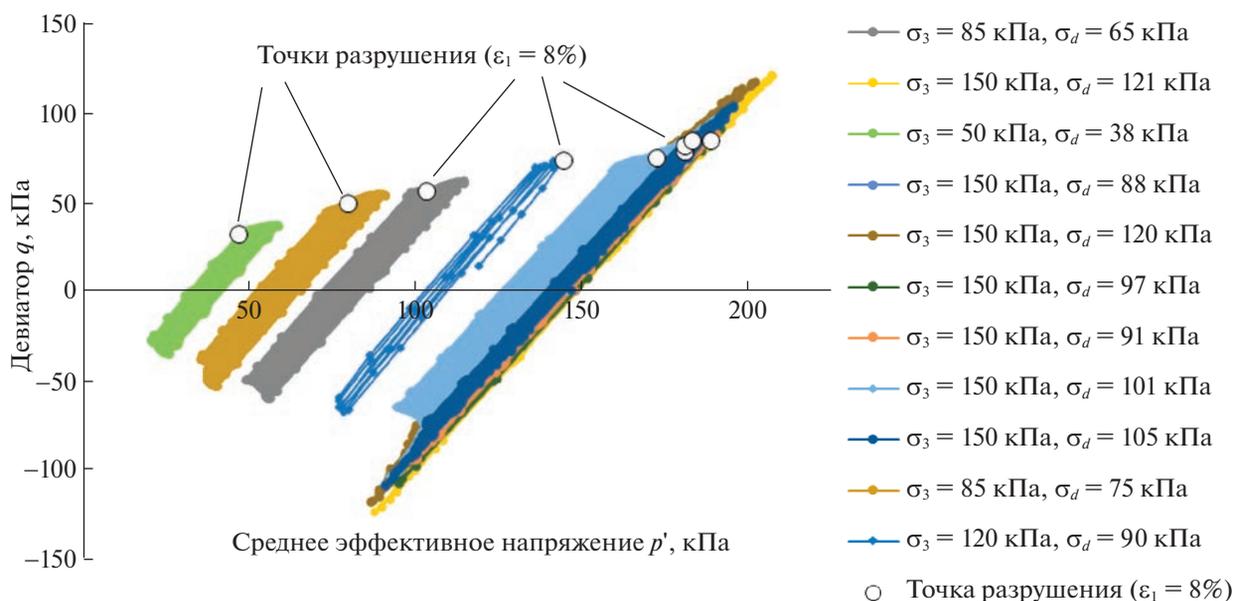


Рис. 7. Траектории динамических трехосных испытаний модельных образцов глины легкой пылеватой тугопластичной.

ГОСТ 12248.3-2020 при испытаниях грунтов в условиях трехосного сжатия [5].

Полученные данные показывают, что среднее значение осевой деформации при разрушении исследованного глинистого грунта в серии статических испытаний составляет 8% (см. рис. 1). Поэтому “точки разрушения” на траекториях эффективных напряжений при динамическом нагружении были идентифицированы при предельной 8-процентной осевой деформации (рис. 7, 8).

Из приведенных на рис. 8 результатов следует, что модельный глинистый грунт в поле эффективных напряжений характеризуется линиями разрушения ($FL\ p'-q$) при статическом и динамическом нагружении:

$q = 0.36p' + 53.63$ и $q = 0.34p' + 18.53$ соответственно.

На рис. 9а для этого же грунта построены Круги Мора из условия разрушения при напряжениях, соответствующих уровню деформации 8%. При анализе результатов статических и динамических трехосных испытаний видно, что и в одном, и в другом режиме нагружения исследуемый грунт имеет неизменный угол внутреннего трения, равный 10° . Величина сцепления при статических трехосных испытаниях составляет 27 кПа, при динамических 10 кПа.

В рамках этого же методического подхода к определению мобилизуемой прочности глинистого грунта были обработаны данные статиче-

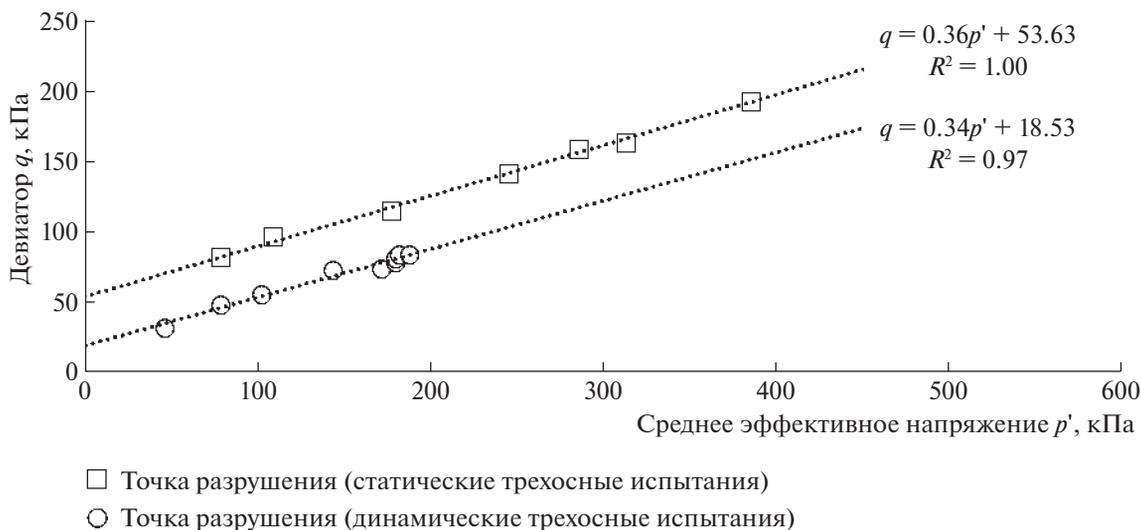


Рис. 8. Линии разрушения ($FL p'-q$) при статических и динамических трехосных испытаниях модельных образцов глины легкой пылеватой тугопластичной.

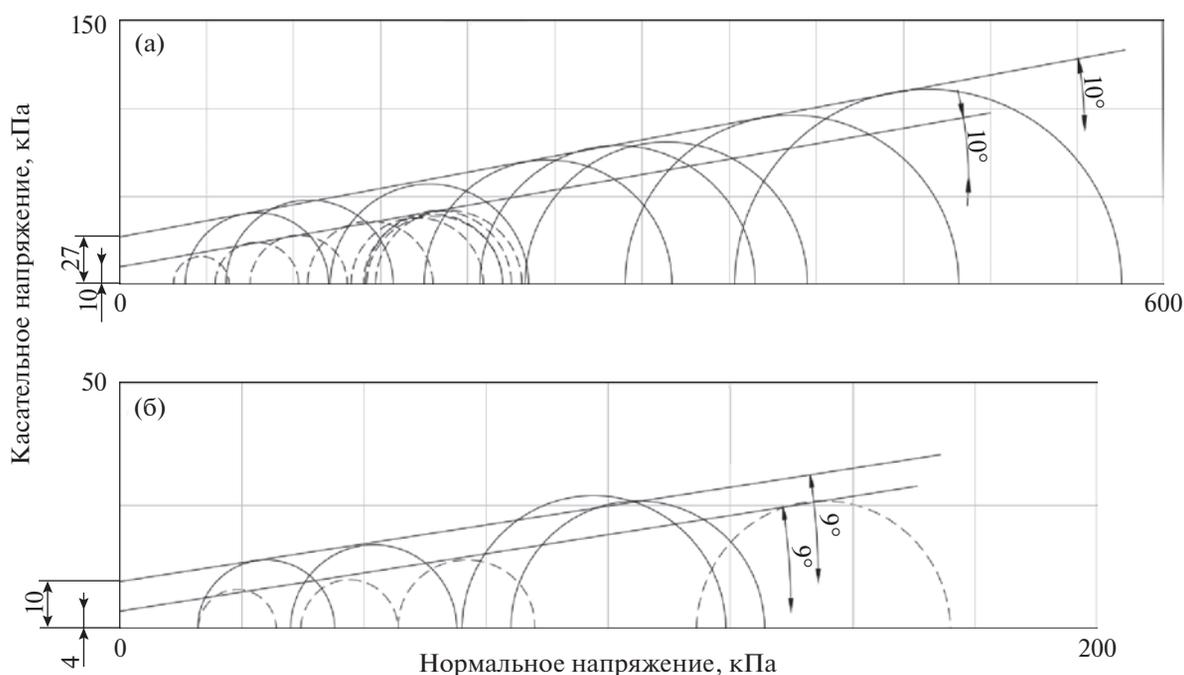


Рис. 9. Диаграмма Кулона–Мора по результатам статических (сплошная линия) и динамических (пунктирная линия) трехосных испытаний для образцов модельной глины легкой пылеватой тугопластичной (А) и глины тяжелой текуче-пластичной (Б).

ских и динамических испытаний образцов глины тяжелой мягкопластичной четвертичного возраста морского генезиса при природном сложении. Полученные данные показывают, что среднее значение осевой деформации при разрушении этого глинистого грунта в статических условиях составляет 4%. Следовательно, точки разрушения при динамическом нагружении идентифицированы нами при 4-процентной осевой деформации.

На рис. 9б по результатам статических и динамических трехосных испытаний построены Круги Мора. При их анализе видно, что и в одном, и в другом режиме нагружения исследуемый грунт имеет неизменный угол внутреннего трения, равный 9°. Величина сцепления при статических трехосных испытаниях составляет 10 кПа, при динамических 4 кПа.

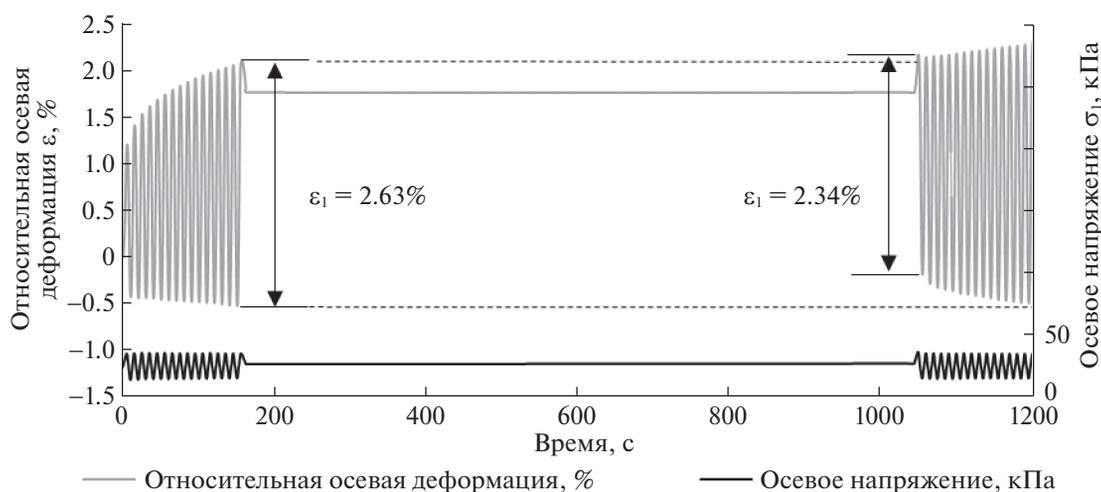


Рис. 10. Кинетика накопления относительной осевой деформации при динамическом нагружении образца глины легкой пылеватой тугопластичной ($\sigma_3 = 50$ кПа, $\sigma_d = 13$ кПа).

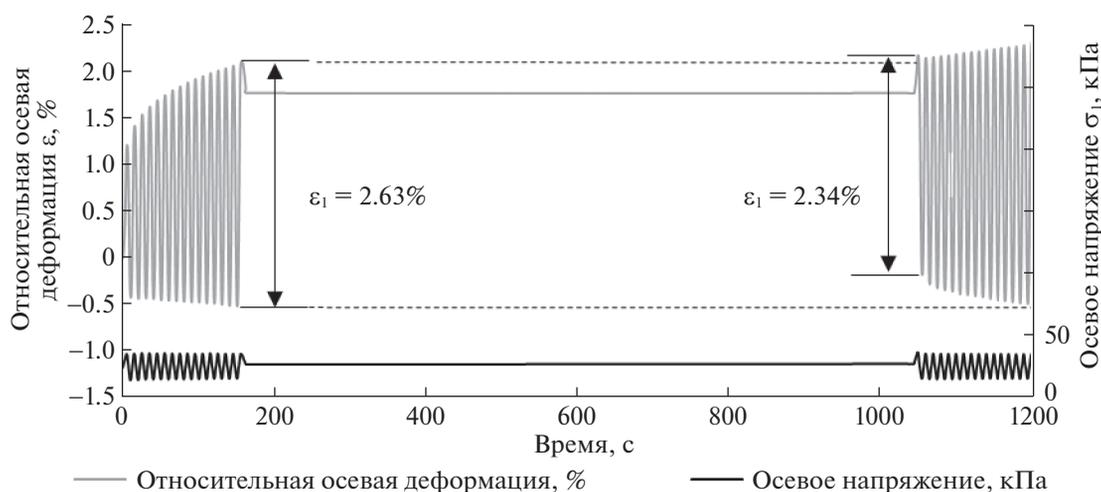


Рис. 11. Кинетика накопления относительной осевой деформации при динамическом нагружении образца глины тяжелой текучепластичной ($\sigma_3 = 50$ кПа, $\sigma_d = 13$ кПа).

Неизменность угла внутреннего трения и уменьшение сцепления при динамических испытаниях по сравнению со статическими при прочих равных условиях следует ожидать и для других глинистых грунтов с преобладанием коагуляционных межчастичных контактов. Это связано, прежде всего, с тем, что коэффициент трения любого материала не зависит от режима нагружения. Уменьшение же сцепления, по мнению авторов, происходит за счет проявления тиксотропных свойств исследованных водонасыщенных глинистых грунтов при действии динамической нагрузки.

Для доказательства проявления тиксотропных свойств исследованных глинистых грунтов проведены динамические трехосные испытания по следующей схеме. После подготовки образца,

проверки степени водонасыщения и изотропной консолидации в 50 кПа проведено 15 циклов динамического нагружения грунта с амплитудой осевой нагрузки 13 кПа и частотой 0.1 Гц. После 15-минутного перерыва с сохранением всестороннего обжимающего напряжения грунт повторно нагружался с аналогичными амплитудой, частотой и длительностью динамической нагрузки. Результаты двух динамических трехосных испытаний на образцах глины легкой пылеватой тугопластичной и глины тяжелой тугопластичной представлены на рис. 10 и 11.

Анализируя тренд развития осевой деформации во времени, в обоих случаях можно выделить следующие особенности:

– в течение первичного динамического нагружения глинистого образца происходит планомерный рост осевой деформации и ее амплитуды, который связан с тиксотропным разупрочнением за счет разрыва межчастичных контактов при взаимном смещении частиц под действием динамической нагрузки;

– после 15-минутного перерыва в нагружении амплитуда деформации спадает, что, наиболее вероятно, связано с частичным тиксотропным упрочнением грунта за время отдыха, а затем постепенно снова возрастает при дальнейшем нагружении.

Таким образом, было показано, что исследованные грунты действительно обладают тиксотропными свойствами и, следовательно, снижение сцепления при динамическом нагружении по сравнению со статическими условиями свидетельствует о частичном разупрочнении таких дисперсных систем.

ВЫВОДЫ

1. Напряженное состояние глинистых грунтов в момент разрушения следует фиксировать на траектории эффективных напряжений как максимальное значение девиатора при соответствующем ему среднему эффективному напряжении в том цикле нагружения, при котором уровень осевой деформации впервые достигает ее среднего предельного значения, характерного для разрушения этого же грунта в статических трехосных испытаниях. Напряженное состояние глинистого грунта при этом, по мнению авторов, соответствует его прочности, мобилизуемой в условиях динамического нагружения.

2. Параметры прочности, экспериментально полученные на модельном водонасыщенном глинистом грунте заданной плотности и влажности, показывают равенство углов внутреннего трения в сериях статических и динамических трехосных испытаний и уменьшение сцепления в 2.5–3.0 раза при динамическом нагружении в отличие от статического. Аналогичный результат получен и на глинистом грунте с коагуляционной структурой природного сложения.

3. Определение параметров динамической прочности водонасыщенных глинистых грунтов предполагает предварительную экспериментальную оценку величины предельной деформации при разрушении в статических условиях и экспериментальную оценку степени снижения сцепления грунта в динамических условиях. Угол же внутреннего трения может приниматься неизменным.

Работа выполнена на оборудовании, приобретенном в рамках реализации Программы развития Московского университета.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Аверочкина М.В.* Об особенностях распространения колебаний в железнодорожном земляном полотне // Волны в грунтах и вопросы виброметрии: матер. III Всесоюзной конф., Ташкент: Фан, 1975. С. 206–209.
2. *Аверочкина М.В.* О влиянии динамических нагрузок на прочность грунтов // Инженерная геология. 1983. № 1. С. 93–96.
3. *Велли Ю.А.* К вопросу о сейсмической устойчивости намывных ядерных плотин // Сб. тр. ЛИСИ. 1958. № 28. С. 87–126.
4. *Вознесенский Е.А.* Динамическая неустойчивость грунтов: дисс. ... д. геол.-мин. н. М.: МГУ им. М.В. Ломоносова. 2000. 368 с.
5. ГОСТ 12248.3-2020. Грунты. Определение характеристик прочности и деформируемости методом трехосного сжатия. М.: Стандартинформ, 2020. 31 с.
6. ГОСТ 25100-2011. Грунты. Классификация. М.: Стандартинформ, 2013. 44 с.
7. ГОСТ 30416-2020. Грунты. Лабораторные испытания. Общие положения. М.: Стандартинформ, 2020. 16 с.
8. *Ермолаев Е.Н., Сенин Н.В.* Сопротивление грунтов сдвигу при колебаниях // Основания, фундаменты и механика грунтов. 1968. № 1. С. 8–10.
9. *Жинкин Г.Н.* Исследования тиксотропных глинистых грунтов // Сб. Ленингр. института инженеров железнодорожного транспорта. Ленинград: ЛИИЖТ. 1956. № 234. С. 71–86.
10. *Жинкин Г.Н., Прокудин И.В.* Результаты лабораторных исследований прочностных характеристик глинистых грунтов при динамических нагрузках // Сб. Ленингр. института инженеров железнодорожного транспорта. Ленинград: ЛИИЖТ, 1975. № 387. С. 5–52.
11. *Зарубина Л.П.* Исследование влияния динамических нагрузок на прочностные свойства земляного полотна: автореф. дисс. ... канд. техн. н. Ленинград: ЛИИЖТ, 1970. 22 с.
12. *Кистанов А.И.* Исследование вибродинамического воздействия поездов на глинистые грунты земляного полотна: дисс. ... канд. техн. н. Ленинград: ЛИИЖТ, 1969. 170 с.
13. *Кутергин В.Н.* Изменение прочности глинистого грунта при вибрации // Сб. статей института литосферы АС СССР: Изменение геологической среды под влиянием деятельности человека. М.: Наука, 1982. С. 96–104.
14. *Кутергин В.Н.* Закономерности изменения свойств глинистых грунтов при вибрации. М.: Наука, 1989. 142 с.
15. *Лагойский А.И.* Исследование тиксотропных изменений глинистых грунтов в железнодорожном земляном полотне: автореф. дисс. ... канд. техн. н. Ленинград: ЛИИЖТ, 1962. 23 с.
16. *Мусаэлян А.А.* Динамические характеристики лесовых грунтов // Динамика оснований, фундаментов и подземных сооружений: мат. IV Всесоюзной конф., Ташкент: Фан, 1977. С. 174–178.

17. Преображенская Н.А. Экспериментальные данные о погружении и извлечении шпунта и свай вибрированием в песчаных грунтах // Сб. трудов НИИОСП: Динамика грунтов. 1958. № 32. М.: Госстройиздат, С. 66–82.
18. Преображенская Н.А., Савченко И.А. О влиянии вибраций на сопротивление глинистых грунтов сдвигу // Сб. трудов НИИОСП: Динамика грунтов. 1958. № 32. М.: Госстройиздат, С. 89–92.
19. Прокудин И.В. Прочность и деформативность железнодорожного земляного полотна из глинистых грунтов, воспринимающих вибродинамическую нагрузку: дис. ... докт. техн. н. Ленинград: ЛИИЖТ, 1982. 458 с.
20. Ребиндер П.А. Физико-химическая механика дисперсных структур и твердых тел. 2-е изд. М.: МГУ, 1968. С. 334–414.
21. Савченко И.А. Влияние вибраций на внутреннее трение в песках // Сб. трудов НИИОСП: Динамика грунтов. 1958. № 32. М.: Госстройиздат, С. 83–88.
22. Соколов В.А. К вопросу учета динамических нагрузок от подвижного состава при расчете устойчивости откосов земляного полотна // Труды НИИЖТ. 1956. № XII. С. 30–39.
23. Трофименков Ю.Г., Добровольский А.А. Влияние имитированных сейсмических воздействий на прочностные и деформационные свойства грунтов // Волны в грунтах и вопросы виброметрии: матер. III Всесоюзной конф. Ташкент: Фан, 1975. С. 118–126.
24. Тубольцев В.М., Шанина А.Н. Влияние вибраций, возникающих от действия подвижной нагрузки, на изменение прочностных характеристик связанных грунтов // Вопросы геотехники. 1969. № 15. С. 40–47.
25. Ishihara K., Kasuda K. Dynamic strength of cohesive soil // Proc. of the 6th Conf. on soil mechanics and foundation engineering. 1984. P. 91–98.
26. Ishihara K., Nagao A., Mano R. Residual strength of clay under seismic loading // Proc. of the 4th Canadian Conf. on Earthquake Engineering. 1983. P. 13.
27. Ishihara K., Tatsuoka F., Yasuda S. Undrained deformation and liquefaction of sand under cyclic stresses // Soil and foundations. 1975. № 1. (15). P. 29–44.

DYNAMIC STRENGTH PARAMETERS OF CLAY SOILS AND METHODS FOR THEIR DETERMINATION

E. A. Sentsova^{a,#}, M. S. Nikitin^{a,##}, and E. A. Voznesensky^{a,b,###}

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

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

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

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

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

Correct determination of strength properties is always relevant for the prediction of soil mechanical behavior. This issue in a static formulation of the problem is widely discussed in technical literature. However, the determination of strength properties under dynamic loading remains debatable. This paper discusses a new methodological approach developed to determine the parameters of dynamic shear strength of saturated samples of model clay soils based on a combined analysis of static and dynamic triaxial testing data. It is demonstrated that, other conditions being equal, the value of the angle of internal friction of clay soil samples with predominantly a coagulative structure is the same under static and dynamic conditions; however, cohesion decreases under dynamic loading and this effect is attributed to the thixotropic strength loss in such a soil.

Keywords: *laboratory tests, dynamic triaxial test, soil strength, thixotropy*

REFERENCES

1. Averochkina, M.V. [Features of the propagation of vibrations in the railway track]. Proc. 3th All-Union Conf. on waves in soils and issues of vibrometry. Tashkent, Fan Publ., 1975, pp. 206–209. (in Russian)
2. Averochkina, M.V. [Influence of dynamic loads on the soil strength]. *Inzhenernaya geologiya*, 1983, no. 1, pp. 93–96. (in Russian)
3. Velli, Yu.A. [Seismic stability of alluvial nuclear dams]. Collection of articles LISI, 1958, no. 28, pp. 87–126. (in Russian)
4. Voznesenskii, E.A. [Dynamic instability of soils]. Doctoral Sci. (Geol.-Min.) dissertation, Moscow, MSU Publ., 2000, 368 p. (in Russian)
5. [State Standard 12248.3-2020. Soils. Determination of strength and deformation parameters by triaxial compression testing]. Moscow, Standartinform Publ., 2020, 31 p. (in Russian)
6. [State Standard 25100-2011. Classification]. Moscow, Standartinform Publ., 2013, 44 p. (in Russian)
7. [State Standard 30416-2020. Soils. Laboratory testing. General issues]. Moscow, Standartinform Publ., 2020, 16 p. (in Russian)

8. Ermolaev, E.N., Senin, N.V. [Shear resistance of soil during vibrations]. *Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov*, 1968, no. 1, pp. 8–10. (in Russian)
9. Zhinkin, G.N. [Studies of thixotropic clay soils]. Collection of articles LIIZHT, 1956, no. 234, pp. 71–86. (in Russian)
10. Zhinkin, G.N., Prokudin, I.V. [Laboratory test results of the strength characteristics of clay soils under dynamic loads]. Collection of articles LIIZHT, 1975, no. 387, pp. 5–52. (in Russian)
11. Zarubina, L.P. [Influence of dynamic loads on the strength properties of the subgrade]. Extended abstract Cand. Sci. (Techn.) Dissertation, Leningrad, LIIZHT Publ., 1970, 22 p. (in Russian)
12. Kistanov, A.I. [Study of the influence of the vibrodynamic impact of trains on the clayey soils of the subgrade]. Extended abstract Cand. Sci. (Techn.) Dissertation, Leningrad, LIIZHT Publ., 1969, 170 p. (in Russian)
13. Kutergin, V.N. [Changing strength of clay soils under vibration]. In: [Geoenvironment transformation under the human impact]. Proc. Lithosphere Institute, USSR Academy of Sciences, 1982, pp. 96–104. (in Russian)
14. Kutergin, V.N. [Patterns of changes in soil properties during vibration]. Moscow, Nauka Publ., 1989, 142 p. (in Russian)
15. Lagoiskii, A.I. [Study of thixotropic changes in clayey soils in the railway subgrade]. Extended abstract Cand. Sci. (Techn.) Dissertation, Leningrad, LIIZHT Publ., 1962, 23 p. (in Russian)
16. Musaelyan, A.A. [Dynamic characteristics of loess soils]. Proc. 4th All-Union Conf. “Dynamics of foundations and underground structures”, Tashkent, Fan Publ., 1977, pp. 174–178. (in Russian)
17. Preobrazhenskaya, N.A. [Experimental data of loading and extraction of sheet piles and piles by vibration in sandy soils]. Collection of articles NIIOSP: Soil and rock dynamics, 1958, no. 32, pp. 66–82. (in Russian)
18. Preobrazhenskaya, N.A., Savchenko, I.A. [Influence of vibration on shear resistance of clay soils]. Collection of articles NIIOSP: Soil and rock dynamics, 1958, no. 32, pp. 89–92. (in Russian)
19. Prokudin, I.V. [Strength and deformability of a railway subgrade made of clayey soils that perceive a vibrodynamic load]. Doctoral Sci. (Techn.) dissertation, Leningrad, LIIZHT Publ., 1982, 458 p. (in Russian)
20. Rebinder, P.A. [Physicochemical mechanics of dispersed structures and solids], 2nd edition, Moscow, MSU Publ., 1968, pp. 334–414. (in Russian)
21. Savchenko, I.A. [Influence of vibration on internal friction in sands]. Collection of articles NIIOSP: Soil and rock dynamics, 1958, no. 32, pp. 83–88. (in Russian)
22. Sokolov, V.A. [Consideration of dynamic loads from the rolling stock upon calculation of subgrade slope stability]. Collection of articles LIIZHT, 1956, no. 12, pp. 30–39. (in Russian)
23. Trofimenkov, Yu.G., Dobrovol'skii, A.A. [Influence of simulated seismic impacts on the strength and deformation properties of soils]. Proc. 3rd All-Union Conf. on Waves in soils and issues of vibrometry. Tashkent, Fan Publ., 1975, pp. 118–126. (in Russian)
24. Tubol'tsev, V.M., Shanina, A.N. [The effect of vibration from the impact of moving load on the change in the strength characteristics of cohesive soils]. *Voprosy geotekhniki*, 1969, no. 15, pp. 40–47. (in Russian)
25. Ishihara, K., Kasuda, K. Dynamic strength of cohesive soil. Proc. of the 6th Conf. on soil mechanics and foundation engineering, 1984, pp. 91–98.
26. Ishihara, K., Nagao, A., Mano, R. Residual strength of clay under seismic loading. Proc. of the 4th Canadian Conf. on Earthquake Engineering, 1983. p. 13.
27. Ishihara, K., Tatsuoka, F., Yasuda, S. Undrained deformation and liquefaction of sand under cyclic stresses. *Soil and foundations*, 1975, no. 1, (15), pp. 29–44.

ЗАГРЯЗНЕНИЕ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

УДК 504.064:57.045

ВЛИЯНИЕ УГЛЕВОДОРОДНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ НА ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ПЕСЧАНЫХ ПОЧВ ТЕРРИТОРИИ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ДЗУНБАЯН (ВОСТОЧНАЯ МОНГОЛИЯ)

© 2023 г. Л. А. Гаретова^{1,*}, Г. В. Харитонов¹, Е. Л. Имранова¹¹Институт водных и экологических проблем ДВО РАН,
ул. Дикопольцева, 56, Хабаровск, 680000 Россия

*E-mail: micro@iver.as.khb.ru

Поступила в редакцию 11.02.2023 г.

После доработки 30.03.2023 г.

Принята к публикации 14.04.2023 г.

Представлены данные по гранулометрическому составу, содержанию углеводов, их молекулярному составу и численности микроорганизмов в почвах участка нефтедобычи Дзунбаян (Восточная Гоби, Монголия). Доминирующей литологической фракцией в исследованных почвах являются частицы с размером 2–20 мкм (99.5–99.8%). Показано, что по химическому составу почвы являются осолоненными со щелочными значениями pH. Исследование молекулярно-группового состава *n*-алканов выявило доминирование (66.3–79.2% от суммы *n*-алканов) длинноцепочечных гомологов, находящихся на различной стадии физико-химического и микробиологического выветривания. Микробное сообщество почв по ряду признаков характеризуется высокой степенью адаптации к условиям аридной зоны, солёности, высоким значениям pH. Доля нефтеокисляющих бактерий (НОБ) составляла 12.6–18.9% от общей численности гетеротрофов (ОЧГ), что соответствует высокой адаптационной способности сообщества к углеводородам (УВ).

Ключевые слова: Монголия, почвы, нефтедобыча, гранулометрический состав, засоление, загрязнённость, нефтяные углеводороды, *n*-алканы, бактерии

DOI: 10.31857/S0869780923030037, EDN: WMITLW

ВВЕДЕНИЕ

В районах добычи углеводородного сырья механические воздействия на почвы и химическое загрязнение часто проявляются совместно и в различных сочетаниях. В процессе нефтедобычи выделяются три основные группы загрязнителей почв и среды: нефть – непосредственный продукт добычи; поллютанты и растворы, применяемые в процессе добычи; газообразные продукты рассеяния, загрязняющие атмосферу и почвенный воздух [9]. При бурении основные потоки загрязнителей преимущественно связаны с буровыми растворами, шламами и реагентами, воздействующими на прилегающую территорию. Среди реагентов применяются разжижители, термостабилизаторы, эмульгаторы, утяжелители, кислоты, ПАВ, растворы хлорида натрия и др.; буровые растворы, используемые на месторождениях, – пресные и солёные (до 3 г/дм³) жесткие хлоридные кальциево-натриевые [21, 33, 44]. Основную нагрузку от этих потоков принимают на себя почвы, поверхностные и подземные воды. Сырые, содержащие пластовые жидкости нефти представляют собой сложные смеси, состоящие из большого

числа углеводородов разнообразного состава (метановых, нафтеновых, ароматических и др.) и высокомолекулярных смолисто-асфальтеновых веществ [24, 25]. В научной литературе эти углеводородистые смеси нередко собирательно именуется “нефтепродуктами”, “техногенными углеводородами”, “нефтяными углеводородами”, “битуминозными веществами” или просто “углеводородами” (УВ) вне зависимости от их происхождения. Определение устойчивости фракций нефти к биологической деградации является важным теоретическим и практическим вопросом [15, 28, 29, 36, 47]. К группе высокочувствительных к окислению соединений относятся *n*-алканы и *изо*-алканы, которые могут быть подвержены микробиологической деградации до 80–100% от исходного содержания компонентов [15].

Важнейшие следствия углеводородного загрязнения почв – это изменения их физико-химических характеристик. Во всех природных условиях наблюдается трансформация почвенного поглощающего комплекса и подщелачивание. В нефтезагрязнённых почвах возникают разнонаправленные процессы, с одной стороны – физи-

ко-химическая и биологическая деструкция нефтяных углеводородов, а с другой – взаимодействие нефти и нефтепродуктов с почвенными органическими соединениями и минеральными компонентами [1, 17, 31, 40]. Доминирование процессов деструкции УВ нефти зависит от микробиологической активности и окислительно-восстановительных свойств почв [16].

Несмотря на большое количество работ по микробиологии нефтезагрязненных почв, данных о чувствительности и устойчивости разных групп почвенных организмов к воздействию нефти и НП до сих пор недостаточно [28]. Известно, что при нефтяном загрязнении почвы происходит резкое изменение численности, видового состава бактериального сообщества, а также продолжительности их активного функционирования в верхних горизонтах профиля [36].

В сфере влияния техногенных потоков УВ в любых физико-географических условиях происходит превращение исходных почв (минеральных и органогенных) автономных и подчиненных ландшафтов в техногенно-обусловленные модификации, обладающие сочетанием свойств, которые практически не встречаются в условиях зонального почвообразования. Так, в лесостепных и степных ландшафтах под воздействием нефти и НП формируются техногенно-засоленные и осолонцованные серые лесные почвы и черноземы, а также хемочерноземы битуминозные [6]. В полупустынной и пустынной зонах почвы бурые, серо-бурые, солонцы, солончаки, лугово-бурые и аллювиальные замещаются техногенными битуминозными почвами с сильным поверхностным засолением [20].

Территория Монголии вследствие своего географического положения имеет засушливый и холодный климат, характерный для среднеширотного высокогорья и отличается дефицитом влажности. Толщина увлажненного слоя почвы редко превышает 20–30 см [5, 34, 46]. Снежный покров очень незначительный, поэтому зимой почвы полностью промерзают. Из-за континентального климата как внутригодовые, так и суточные колебания температуры экстремальные. Колебания могут достигать 30°C в один день, а разница в средних значениях между низкой температурой зимой и высокой температурой лета свыше 50°C (в отличие от Европы, где эта величина составляет 25°C [38]). Засоленные почвы мозаичны, их площадь около 10.5% [18]. Они генетически связаны с древними накоплениями солей и/или с процессами современного соленакопления, приуроченными к геохимически подчиненным гидроморфным ландшафтам [39, 41].

Месторождение Дзунбаян расположено в юго-восточной части Монголии (провинция Восточная Гоби), в 440 км к востоку от Улан-Батора.

Оно принадлежит центральной части Дзунбаянской депрессии и находится на высоте 760 м над уровнем моря. За время эксплуатации, начиная с 1990-х годов прошлого века на Дзунбаянском месторождении пробурено свыше 200 скважин глубиной до 3 км. Были установлены новые структуры, благоприятные для скоплений нефти и газа. Нефть месторождения Дзунбаян по своим физико-химическим свойствам очень вязкая, тяжелая, с высоким содержанием смолистых компонентов и парафинов; выход светлых фракций всего 5–6%, твердых УВ не менее 11% [35].

Исследования, затрагивающие аспекты поведения в почвах различных групп техногенных УВ, в том числе и широкой гаммы индивидуальных *n*-алканов, представляют как теоретический, так и практический интерес [4, 13, 23–25]. Среди нефтяных компонентов наиболее изученными являются насыщенные УВ, сохранившие черты исходных биомолекул – *n*-алканы, в то же время их поведение в почвах районов нефтедобычи изучено слабо.

Целью данной работы являлась оценка состояния почв в районе месторождения Дзунбаян, их литологического и углеводородного состава, а также состояния почвенных микробных комплексов, участвующих в процессах самоочищения почв от поллютантов.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Район исследования находится в 45 км на юг от г. Сайшанды (Восточно-Гобийский аймак). Площадь разведочного участка месторождения Дзунбаян составляет 5321 км², эксплуатационная площадь – 239.5 м². Пробы почв отбирали вокруг обвалованного участка эксплуатационной скважины на расстоянии 2.0 м (северной, восточной и западной ориентации), 5.0 и 30.0 м от южной границы его периметра. Отбор образцов почв и их химический анализ осуществлялись в соответствии с ГОСТ 17.4.3.01-2017 [7].

Для химических и микробиологических анализов отбирали пробы почв (0.5 кг) с глубины 0–20 см. Для гранулометрического анализа образцы грунта, высушенные до воздушно-сухого состояния, растирались в фарфоровой ступке пестиком с резиновым наконечником и пропускались через сито с размером ячеек 2 мм. Размерный состав данной фракции почв изучали методом лазерной дифракции на приборе SALD-2300 (Wing SSALD II: Version 3.0.7. Shimadzu (Япония). Определение pH, удельной электропроводности (УЭП) и солёности (S) осуществляли в почвенной вытяжке в соотношении почва/дистиллированная вода = 1/5. Определение параметров производили с помощью измерителя комбинированного Seven Multi S-47k, Mettler-Toledo (Швейцария).

Таблица 1. Физико-химические характеристики почв на территории месторождения Дзунбаян

№ образца	Расстояние, м ориентация	Описание образца	УВ, мг/кг	Водная вытяжка		
				УЭП, См/см	pH	соленость, епс*
M1	2 – юг	Глинисто-песчаный, желтый	60	3.09	8.15	1.63
M2	2 – восток	Глинисто-песчаный, ярко-желтый	58	4.50×10^{-3}	8.15	2.37
M3	2 – запад	Глинисто-песчаный, желтый	53	2.68×10^{-3}	8.16	1.41
M4	5 – север	Песчано-глинистый, светло желтый	15	7.39×10^{-8}	8.67	0.30
M5	30 – север	Песчанистый, светло-желтый	9	3.17×10^{-8}	8.16	0.13

* – единицы практической солёности.

Определение массовой доли нефтепродуктов (НП) в почвах выполняли по методике [26]. Фракцию УВ выделяли экстракцией четыреххлористым углеродом (тетрахлорметан, CCl_4), очищали от сопутствующих полярных соединений на колонке с оксидом алюминия 2-й степени активности по Брокману. Измерения проводили на концентратометре КН-2 (Сибэкоприбор, Россия). Элюаты CCl_4 использовали для хроматографического определения молекулярного состава и содержания *n*-алканов и *изо*-алканов, который осуществляли методом капиллярной газовой хроматографии на газовом хроматографе Кристалл 5000.1 (Хроматэк, Россия), оснащённом пламенно-ионизационным детектором при программировании температуры от 60 до 320°C (скорость 7°/мин, длина колонки 30 м, жидкая фаза ZB-5). Хроматографические анализы выполняли в ЦКП ИВЭП “Центр экологического мониторинга” (аналитик Г.М. Филиппова).

Для учета численности микроорганизмов применяли следующие среды: разбавленный в 10 раз рыбопептонный агар – для общей численности гетеротрофных бактерий (ОЧГ); крахмало-аммиачный агар – для бактерий, усваивающих минеральный азот и актиномицетов; среду Раймонда с нефтью – для нефтеокисляющих бактерий (НОБ). Результаты подсчета выражали в численности колониеобразующих единиц (КОЕ) микроорганизмов в 1 г абсолютно сухой почвы [27].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Физико-химические параметры почв

Исследованная территория представляет собой чрезвычайно нарушенную природную систему с максимальной степенью деградации почвенного покрова. В табл. 1, 2 представлены физико-химические характеристики исследованной почвы. Известно, что УЭП коррелирует с такими свойствами почв, как емкость катионного обмена почвы,

содержание органического вещества (ОВ), степень засоления.

В исследованных образцах УЭП водной вытяжки варьировала более значительно, чем pH. Максимальные ее значения выявлены в образце M1, где УЭП составляла 3.09 См/см, по мере удаленности от скважины величина УЭП снижалась до 3.17×10^{-8} См/см на расстоянии 30 м. По всей видимости, такое изменение величины УЭП демонстрирует снижение содержания НУ в почве и ее солёности. Величина pH водной вытяжки характеризовалась щелочной реакцией и варьировала от 8.15 до 8.67, что характерно для данного типа почв. Солёность водной вытяжки исследованных образцов почв составляла от 0.13 до 2.37‰. По установленной градации [2, 18] образцы почвы M1, M2 и M3 относятся к сильно засоленным, образец M4 – слабозасоленным, а почва M5 – незасоленная, т.е. по мере удаления от буровой скважины степень засоления почвы уменьшалась. Вероятно, такой разброс в солёности близко расположенных точек отбора проб обусловлен как первичным осолонением почв, так и воздействием буровых растворов. Известно, что в перспективе при хроническом нефтяном загрязнении почвы полупустынной и пустынной зон

Таблица 2. Гранулометрический состав почв месторождения Дзунбаян

№ образца	Размер фракций, мкм				
	<2	2–20	20–50	50–200	200–2000
Гранулометрический состав, %					
M1	0.00	99.75	0.16	0.09	0.00
M2	0.00	99.74	0.22	0.04	0.00
M3	0.00	99.69	0.22	0.10	0.00
M4	0.00	99.88	0.02	0.08	0.01
M5	0.00	99.54	0.21	0.24	0.01

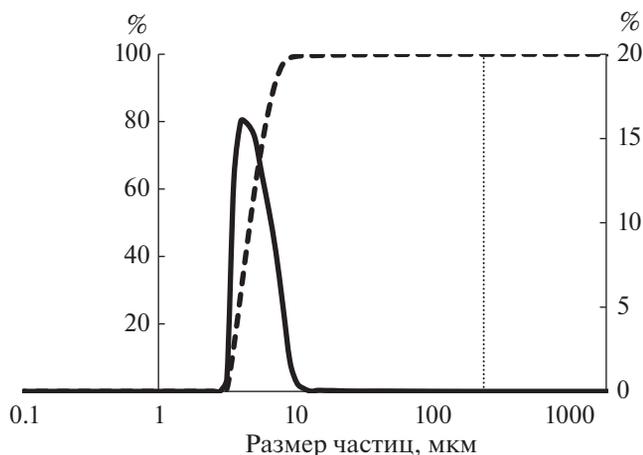


Рис. 1. Распределение частиц по размеру в усредненном образце почвы месторождения Дзунбаян: левая ось ординат – процент частиц для кумулятивных кривых; правая ось ординат – процент частиц для дифференциальных кривых.

бурые, серо-бурые, солонцы, солончаки, лугово-бурые и аллювиальные почвы замещаются техногенными битуминозными почвами с сильным поверхностным засолением [20].

По результатам анализа все исследованные образцы имели крутые кумулятивные кривые, свидетельствующие о хорошей дифференциации частиц и мономодальном их распределении (рис. 1, табл. 2). В составе почв доминирует (99,5–99,8%) пылевая фракция с размером частиц 2–20 мкм. Почвы песчано-пылеватого состава характеризуются высокими адсорбционными свойствами и обладают повышенной нефтеемкостью, а глубина максимально возможного просачивания нефти в таких почвах достигает 8,5 м [6, 8].

Гигиеническое нормирование содержания нефтяных углеводородов в почве связано в основном с миграционно-воздушными и общесанитарными показателями вредности. Безопасной концентрацией НП в почвах и грунтах считается 1 г/кг [3, 6, 30]. При этом в большинстве случаев

Таблица 3. Групповой углеводородный состав нефти месторождения Дзунбаян [35]

Тип углеводородов	Содержание, мас. % в нефти месторождения
Алканы (нормальные, изоалканы)	24.90
Нафтены (моно-, би-, три-, тетра- и пентацикланы)	35.84
Арены (моно-, би-, три-, тетра- и пентаарены)	29.67
Отношение алканы/нафтены	0.69

определяется лишь суммарное содержание НП без учета их природы и качественных характеристик.

Содержание НП в почвах варьировало от 9 до 60 мг/кг при максимальном содержании в образцах, отобранных на расстоянии 2 м от скважины. По данным Ю.И. Пиковского [22], содержание НП в почве (мг/кг): до 100 соответствует “фоновой” концентрации, 100–500 – “повышено фоновой”, 500–1000 – “умеренный уровень” загрязнения, 1000–2000 – “умеренно опасное” загрязнение, 2000–5000 – “сильное” загрязнение, более 5000 – “опасное” загрязнение. В соответствии с этой градацией содержание НП в исследованных образцах почв определяется как фоновое значение. В то же время предлагаются и более жесткие градации содержания УВ. Согласно [32], по содержанию УВ (мг/кг сухого грунта) почвы могут быть разделены на: чистые – 0–5,5, слабо загрязненные – 5,5–25,5, умеренно загрязненные – 25,6–55,5, загрязненные – 55,6–205,5, грязные – 205,6–500, очень грязные – >500. В соответствии с этой градацией почвы, отобранные на удалении от эксплуатационной скважины (М4 и М5), относятся к слабозагрязненным, М3 – к умеренно загрязненным, а почвы вблизи скважины (М1 и М2) являются загрязненными УВ.

Содержание и молекулярный состав алифатических углеводородов

Исследование молекулярного состава алифатических УВ (АУВ), или *n*-алканов, дает представление об их поведении в почвах, генетической принадлежности и диагенетических превращениях, позволяет провести первичную дифференциацию природных и антропогенных источников УВ [4, 43, 45].

Групповой углеводородный состав нефти месторождения Дзунбаян, определенный по результатам масс-спектрометрического анализа [35], показал, что в ее составе нафтеновые УВ преобладают над алканами и аренами (табл. 3).

Содержание *n*-алканов в сырой нефти не превышает 25%. Состав *n*-алканов представлен гомологическим рядом соединений состава от C_9 до C_{41} и характеризуется повышенными концентрациями *n*-алканов от C_{15} до C_{24} . Абсолютные максимумы приходятся на C_{15} , C_{17} и C_{19} , что может свидетельствовать об участии органического вещества морской природы в формировании состава нефти [35].

Содержание *n*-алканов, выделенных из образцов почв, составляет от 2,14 до 3,05 мг/кг, при максимальном содержании в почве близлежащего разреза (М1) с наибольшим содержанием УВ (табл. 4).

Таблица 4. Относительное групповое содержание *n*-алканов в почвенных образцах

Компоненты	№ образца				
	M1	M2	M3	M4	M5
Содержание <i>n</i> -алканов, мкг/г	3.05	2.44	2.14	2.20	2.21
Диапазон идентифицированных гомологов	C ₁₉ –C ₃₉	C ₁₅ –C ₄₀	C ₂₀ –C ₃₇	C ₂₀ –C ₃₇	C ₂₀ –C ₃₉
Содержание, % от общей площади пиков					
C ₁₉	19.63	–	–	–	–
C ₂₀	–	3.79	4.81	5.68	4.92
C ₂₁	5.66	–	–	4.29	–
C ₂₂	–	3.71	7.35	8.52	6.32
C ₂₃	–	3.87	5.90	5.65	–
C ₂₄	3.47	4.15	3.69	3.73	4.96
C ₂₅	–	5.28	5.26	5.81	4.34
C ₂₆	3.47	6.09	6.15	10.25	6.05
C ₂₇	5.48	4.94	6.19	6.46	6.57
C ₂₈	–	3.16	5.72	3.68	–
C ₂₉	6.55	4.68	2.74	3.93	4.95
C ₃₀	6.59	4.62	3.97	5.54	5.27
C ₃₁	7.06	5.76	5.05	3.29	8.21
C ₃₂	6.73	6.89	6.89	5.80	6.05
C ₃₃	–	–	–	–	–
C ₃₄	7.17	–	8.04	5.46	7.11
C ₃₅	7.06	5.11	8.80	5.82	6.91
C ₃₆	7.73	6.41	9.01	7.92	8.65
C ₃₇	7.12	9.24	10.34	8.12	10.44
C ₃₈	–	–	–	–	–
C ₃₉	5.03	8.25	–	–	9.25
C ₄₀	–	8.52	–	–	–
ΣC ₁₉ –C ₂₅ , %	28.76	20.80	27.01	33.68	20.54
ΣC ₂₆ –C ₄₀ , %	71.24	79.21	73.00	66.32	79.46
ΣC ₂₇ , C ₂₉ , C ₃₁ , %	19.09	15.38	13.99	13.68	19.74
СРІ	1.80	1.09	0.82	0.77	1.03
ОЕР _{C₂₇}	1.58	0.53	0.53	0.46	1.09
ОЕР _{C₂₉}	0.99	0.60	0.28	0.43	0.94
ОЕР _{C₃₁}	0.53	0.50	0.46	0.29	0.73
ОЕР _{C₃₅}	0.47	0.80	0.51	0.44	0.44
ОЕР _{C₃₇}	0.92	1.44	1.15	1.03	1.21

“–” – не обнаружено (ниже чувствительности прибора).

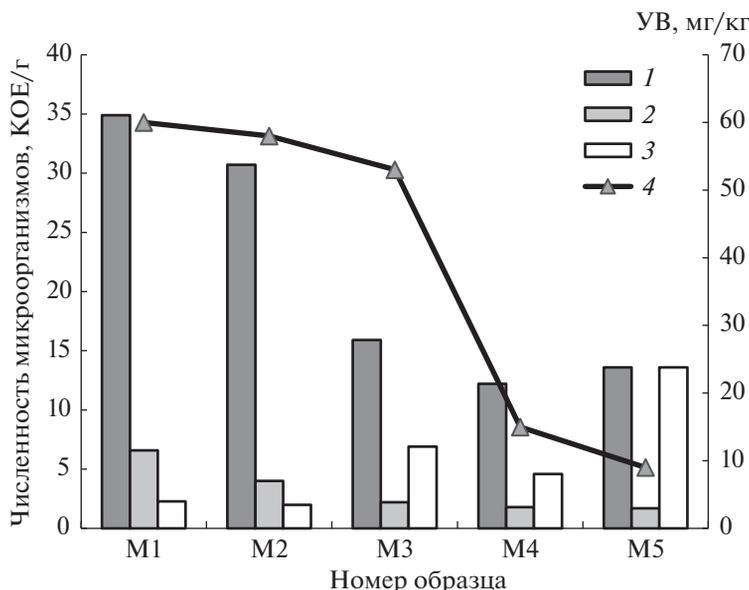


Рис. 2. Численность микроорганизмов в почве месторождения Дзунбаян: 1 – общая численность гетеротрофных бактерий (ОЧГ), млн КОЕ/г; 2 – численность нефтеокисляющих бактерий (НОБ), млн КОЕ/г; 3 – численность актиномицетов, тыс КОЕ/г; 4 – содержание углеводов в почве, мг/кг.

В молекулярном составе *n*-алканов доминируют длинноцепочечные гомологи – от 66.32 до 79.46% от суммы *n*-алканов. Доля среднемолекулярных соединений $\Sigma C_{19}-C_{25}$, характеризующих вклад микробно-деструктивной составляющей в общую сумму УВ, варьировала от 20.54 до 33.68%. Доля УВ терригенного генезиса $\Sigma C_{27}, C_{29}, C_{31}$ невелика (13.68–19.74% от общей суммы).

Высокомолекулярные гомологи $\Sigma C_{26}-C_{40}$ в исследованных почвах находятся на разных стадиях выветривания, на что указывают различия в величине индекса ОЕР (*old-even predominance* – отношение количества нечетного гомолога к сумме ближайших четных *n*-алканов), характеризующего степень трансформации УВ [45]. В большей степени среди данных соединений трансформированы *n*-алканы, генетически связанные с высшей растительностью, – величина индекса ОЕР_{C27}, ОЕР_{C29}, ОЕР_{C31} не превышает 1.58 и варьирует главным образом от 0.28 до 0.99. Величина СРІ (*carbon petroleum index* – отношение нечетных *n*-алканов к четным) в почвах составляла 0.77–1.80, что наряду с величинами ОЕР (в большинстве случаев <1) подтверждает наличие в почве в разной степени трансформированных нефтяных УВ. Известно, что для трансформированных УВ нефтяного генезиса характерно выравнивание соотношения доли четных и нечетных гомологов. Следует отметить, что в составе *n*-алканов почв не выявлены низкомолекулярные гомологи, присутствующие в сырой нефти. Практическое отсутствие легких *n*-алканов в почве обусловлено тем, что они первыми подвергаются микробио-

логической и физико-химической трансформации [42].

Микробные сообщества почв

Полноценное функционирование почвы и реализация биотических функций в большей степени определяются ее микробным сообществом. Микробоценозы очень быстро реагируют на воздействие антропогенного фактора, что позволяет в короткие сроки выявить наиболее уязвимые экологические зоны. Поэтому микробиологические показатели почвы используют для целей экологического мониторинга, оценки устойчивости экосистемы в целом, особенно при различных видах антропогенной нагрузки. Общая численность гетеротрофных бактерий варьировала от 1.22 до 3.49 млн КОЕ/г почвы (рис. 2).

Показано, что при удалении от нефтяной скважины и по мере снижения в почве содержания нефтяных углеводородов (НУ) количество микроорганизмов в ней снижалось. Вероятно, это связано с тем, что в бедных органическим веществом песчаных почвах НУ являются практически единственным источником органического вещества, на содержание которого бактерии реагируют изменением своей численности. Численность НОБ была на порядок ниже (0.17–0.66 млн КОЕ/г), чем ОЧГ и изменялась аналогичным образом. Известно, что регулярное поступление небольших количеств НУ стимулируют развитие нефтеокисляющей способности микроорганизмов [10]. При этом бактериальные сообщества

четко выявляют “концентрационную границу” нефтяного загрязнения, ниже которой микробные ценозы еще справляются с поступающими углеводородами и стабилизируют ситуацию на уровне 40–60 мг/кг сухого грунта [14].

Важным показателем потенциальной активности микробных сообществ, участвующих в процессах самоочищения почв, является содержание в нем НОБ. Считается, что доля НОБ в сообществе гетеротрофных бактерий фоновых природных объектов не превышает условный уровень 10% [19, 37]. Доля НОБ в микробных сообществах исследованных почв составляла от 12.6% в почвенном образце М5 до 18.9% в образце М1, что превышает данную условную величину. Известно, что численность микроорганизмов, особенно группы НОБ в почвах районов нефтедобычи, может быть достаточно высокой [28].

Типичными представителями почвенных микробноценозов являются актиномицеты. Эта группа микроорганизмов активно развивается в почвах, богатых органическим веществом. Актиномицеты плохо переносят изменение влажности, температуры и нефтяное загрязнение [11, 12]. Численность актиномицетов в исследованных почвах была относительно невелика (в пределах сотен тысяч КОЕ/г). По мере приближения к эксплуатационной скважине численность актиномицетов в почве снижалась от максимальной 135.7 тыс. КОЕ/г в образце М5 до минимальной 19.6 тыс. КОЕ/г в образце М2.

В исследованных почвенных образцах не были выявлены микроскопические грибы – типичные представители почвенных микробноценозов всех климатических зон. Вероятнее всего, основной причиной отсутствия микромицетов в почвах является рН среды. Значения рН = 8.15–8.67 обычно не лимитируют развития большинства эколого-трофических групп бактерий, но они крайне неблагоприятны для микромицетов, предпочитающих слабокислую реакцию среды.

Таким образом, выявленные изменения в структуре микробных сообществ почвы демонстрируют ответную реакцию на воздействие солености, рН и концентрации нефти в почве.

ВЫВОДЫ

Выявленные физико-химические особенности исследованных почв пустынной зоны: высокие значения рН, соленость, гранулометрический состав, способствующие аккумуляции тяжелых фракций нефти, в совокупности со специфическими климатическими условиями пустыни Гоби являются факторами, определяющими низкую способность песчаных почв к самоочищению при нефтяном загрязнении.

Анализ углеводородного состава почв на уровне молекулярных маркеров выявил доминирование высокомолекулярных *n*-алканов, находящихся в зависимости от их генетической принадлежности на разных этапах физико-химической и микробиологической трансформации. Вклад микробно-деструктивной составляющей среди выявленных *n*-алканов (20.50–33.7% от их суммы) свидетельствует о достаточно значимой роли микробных сообществ в процессах деструкции нефти в исследованной почве.

Высокие значения солености и рН почвенного раствора ограничивают развитие типичных представителей почвенных микробноценозов – актиномицетов, и в большей степени микроскопических грибов. Тем не менее в таких специфических почвенных условиях сложилось микробное сообщество, обладающее высокой потенциальной активностью к утилизации нефтяных углеводородов.

Содержание НОБ в микробном сообществе почвы (в пределах 20%) соответствует концентрационной границе нефтяного загрязнения для исследованных почв (до 60 мг/кг), и это указывает на то, что микробное сообщество находится на грани реализации способности к самоочищению почвы.

Проведенное исследование показало, что при дальнейшем наращивании добычи нефти в районе Дзунбаян прогноз экологического состояния почв весьма неблагоприятен, поскольку выявленные признаки свидетельствуют о процессах превращения исходной остепненно-пустынной почвы в техногенно-обусловленные модификации.

Авторы выражают благодарность профессору Монгольского государственного университета науки и технологии (Улан-Батор, Монголия) Самбуу Гантумур за помощь в отборе и предоставление образцов почв.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Андреева Т.А.* Интегральная оценка воздействия нефтяного загрязнения на параметры химического и биологического состояния почв таежной зоны Западной Сибири: автореф. дис. ... канд. биол. наук. Томск, 2005. 24 с.
2. *Базилевич Н.И., Панкова Е.И.* Опыт классификации почв по содержанию токсичных солей и ионов // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 1972. Вып. 5. С. 36–49.
3. *Водянова М.Л.* Эколого-гигиеническая оценка способов биоремедиации нефтезагрязненных почв селитебных территорий: автореф. дис. ... канд. биол. наук. М., 2013. 26 с.
4. *Геннадиев А.Н., Завгородняя Ю.А., Пиковский Ю.И., Смирнова М.А.* Алканы как компоненты углеводородного состояния почв: поведение, индикационное значение // Почвоведение. 2018. № 1. С. 37–47.

5. Герасимов И.П., Ногина Н.А., Доржготов Д. Почвенный покров и почвы Монголии. М.: Наука, 1984. 194 с.
6. Герасимова М.И., Строганова М.Н., Можарова Н.В., Прокофьева Т.В. Антропогенные почвы (генезис, география, рекультивация). Смоленск: Ойкумена, 2003. 268 с.
7. ГОСТ 17.4.3.01-2017. Межгосударственный стандарт. Охрана природы. Почвы. Общие требования к отбору проб. М.: Стандартинформ, 2018. 8 с.
8. Дорохова М.Ф., Солнцева Н.П. Экспериментальные исследования процессов миграции нефти в почвах Калининградской области // Геохимия ландшафтов и география почв. 100 лет со дня рождения М.А. Глазовской. М.: АПР, 2012. С. 259–276.
9. Замотаев И.В., Иванов И.В., Михеев П.В., Никонина А.Н. Химическое загрязнение и трансформация почв в районах добычи углеводородного сырья (обзор литературы) // Почвоведение. 2015. № 12. С. 1505–1518.
10. Звягинцев Д.Г., Гузев В.С., Левин С.В., Селецкий Г.И., Оборин А.А. Диагностические признаки различных уровней загрязнения почвы нефтью // Почвоведение. 1989. №1. С. 72–78.
11. Звягинцев Д.Г., Зенова Г.М., Грачёва Т.А., Курапова А.И., Дуброва М.С. Разнообразие почвенных актиномицетных комплексов, обусловленное температурными адаптациями мицелиальных актинобактерий // Теоретическая и прикладная экология. 2011. № 1. С. 4–23.
12. Звягинцев Д.Г., Умаров М.М., Чернов И.Ю., Лысак Л.В. и др. Микробные сообщества и их функционирование в процессах деградации и самовосстановления почв // Деградация и охрана почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2002. С. 401–454.
13. Качинский В.Л., Завгородняя Ю.А., Геннадиев А.Н. Углеводородное загрязнение арктических почв острова Большой Ляховский (Новосибирские острова) // Почвоведение. 2014. № 2. С. 155–168.
14. Кузнецова И.А., Дзюбан А.Н., Косолапов Д.Б. Микробиологические процессы в донных отложениях водоемов бассейна Верхней Волги и их роль в формировании качества водной среды // Современные проблемы биологии и химии. Ярославль: Изд-во Ярослав. гос. ун-та, 2000. С. 55–59.
15. Кураков А.В., Ильинский В.В., Котелевцев С.В., Садчиков А.П. Биоиндикация и реабилитация экосистем при нефтяных загрязнениях. М.: Графикон, 2006. 336 с.
16. Лисовицкая О.В., Можарова Н.В. Влияние углеводородного загрязнения на накопление липидов в почвах // Почвоведение. 2013. № 6. С. 755–760.
17. Оборин А.А., Хмурчик В.Т., Иларионов С.А., Маркарова М.Ю., Назаров А.В. Нефтезагрязненные биогеоценозы (процессы образования, научные основы восстановления, медико-экологические проблемы). Пермь: Изд-во ПГТУ, 2008. 511 с.
18. Панкова Е.И. Засоление почв Монголии // Почвоведение. 1986. № 10. С. 81–90.
19. Патин С.А. Нефть и экология континентального шельфа. М.: ВНИРО, 2001. 247 с.
20. Пермитина В.Н. Трансформация почв нефтепромыслов Прикаспийского региона // Почвоведение и агрохимия. 2011. № 2. С. 20–29.
21. Пиковский Ю.И. Геохимические особенности техногенных потоков в районах нефтедобычи // Техногенные потоки вещества в ландшафтах и состояние экосистем. М.: Наука, 1981. С. 134–148.
22. Пиковский Ю.И. Природные и техногенные потоки углеводородов в окружающей среде. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1993. 207 с.
23. Пиковский Ю.И., Геннадиев А.Н., Красноперова А.А., Пузанова Т.А. Углеводородные геохимические поля в почвах района нефтяного промысла // Вестн. Моск. Ун-та. Сер. 5, география. 2009. № 5. С. 28–33.
24. Пиковский Ю.И., Геннадиев А.Н., Красноперова А.А., Пузанова Т.А. Природные и техногенные углеводородные геохимические поля в почвах: концепция, типология, индикаторное значение // Геохимия ландшафтов и география почв. 100 лет со дня рождения М.А. Глазовской. М.: АПР, 2012. С. 236–258.
25. Пиковский Ю.И., Исмаилов Н.М., Дорохова М.Ф. Нефтегазовая геоэкология – наука XXI века // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2014. Т. 10. № 2. С. 56–62.
26. ПНД Ф 16.1: 2.2.22–98. Методика выполнения измерений массовой доли нефтепродуктов в минеральных, органогенных, органно-минеральных почвах и донных отложениях методом ИК-спектрометрии. М.: Гос. ком. РФ по охране окружающей среды. 2005. 21 с.
27. Практикум по микробиологии: Учеб. пос. для студентов ВУЗов / Под ред. А. И. Нетрусова. М.: Издательский центр “Академия”, 2005. 608 с.
28. Розогина Е.А., Шиманский В.К. Некоторые теоретические аспекты восстановления нефтезагрязненных почвенных экосистем // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2007. № 2. С. 1–16.
29. Тимергазина И.Ф., Переходова Л.С. К проблеме биологического окисления нефти и нефтепродуктов углеводородокисляющими микроорганизмами // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2012. Т. 7. № 1. С. 15.
30. Трофимов С.Я., Прохоров А.Н. Разработка нормативов допустимого остаточного содержания нефти в почвах // Экология производства. 2006. № 10. С. 30–37.
31. Трофимов С.Я., Розанова М.С. Изменение свойств почв под влиянием нефтяного загрязнения // Деградация и охрана почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2002. С. 359–373.
32. Уварова В.И. Современное состояние качества воды р. Оби в пределах Тюменской области // Вестник экологии, лесоведения и ландшафтоведения. 2000. № 1. С. 18–26.
33. Фокина Л.М. Формирование природно-техногенных систем нефтегазовых комплексов. Комплексный мониторинг и оптимальные технологии минимизации экологического ущерба: автореф. дис. ... докт. геол.-минер. наук. Тюмень, 2007. 38 с.

34. *Чижикова Г.П.* Минералогический состав илистой фракции пустынных почв Монголии // Почвоведение. 1988. № 8. С. 44–55.
35. *Хонгорзул Б.* Особенности состава углеводов и высокомолекулярных соединений высокопарафинистых нефтей Монголии: автореф. дисс. ... канд. хим. наук. Томск, 2008. 23 с.
36. *Aislabie J., Foght J.M.* Response of polar soil bacterial communities to fuel spills // Polar Microbiology: The Ecology, Biodiversity and Bioremediation Potential of Microorganisms in Extremely Cold Environments. 2009. P. 215–227.
37. *Atlas R.M.* Microbial hydrocarbon degradation—bioremediation of oil spills // J. Chem. Technol. Biotechnol. 1991. V. 52. № 2. P. 149–156.
38. *Batjargal Z.* Desertification in Mongolia, RALA Report № 200, RALA, Reykjavik. 1992. P. 107–113.
39. *Batukaev A.A., Endovitsky A.P., Andreev A.G., Kalinichenko V.P., et al.* Ion association in water solution of soil and vadose zone of chestnut saline solonchak as a driver of terrestrial carbon sink // Solid Earth. 2016. V. 7. № 2. P. 415–423.
40. *Del'Arco J.P., De Franca F.P.* Influence of oil contamination levels on hydrocarbon biodegradation in sandy sediment // Environm. Pollution. 2001. V. 112. № 3. P. 515–519.
41. *Endovitsky A.P., Kalinichenko V.P., Mischenko N.A., Batukaev A.A., Zarmaev A.A. et al.* Ions association in soil solution as the cause of lead mobility and availability after application of phosphogypsum to chernozem // Journal of Geochemical Exploration. 2017. V. 182. P. 185–192.
42. *Harayama S., Kasai Y., Hara A.* Microbial communities in oil contaminated seawater // Curr. Opin. Biotechnol. 2004. V. 15. № 3. P. 205–214.
43. *Hockun K., Mollenhauer G., Ho S.L., Hefte, J. et al.* Using distributions and stable isotopes of n-alkanes to disentangle organic matter contributions to sediments of Laguna Potrok Aike, Argentina // Organic Geochemistry. 2016. V. 102. P. 110–119.
44. *Johnstone J.F., Kokelj S.V.* Environmental conditions and vegetation recovery at abandoned drilling mudsumps in the Mackenzie Delta region, Northwest Territories, Canada // Arctic. 2008. V. 61. № 2. P. 199–211.
45. *Peters K.E., Walters C.C., Moldowan J.M.* The biomarker guide: Vol. 2, Biomarkers and isotopes in petroleum systems and Earth History. Cambridge University Press. 2007. 704 p.
46. *Yamanaka T., Kaihotsu I., Oyunbaatar D., Ganbold T.* Summertime soil hydrological cycle and surface energy balance on the Mongolian steppe // Journal of Arid Environments. 2007. V. 69. P. 65–79.
47. *Yuting L., Guanghe L., Van Nostrand J.D., Zhili H., et al.* Microarray based analysis of microbial functional diversity along an oil contamination gradient in oil field // FEMS Microbiol Ecol. № 70. 2009. P. 324–333.

HYDROCARBON CONTAMINATION IMPACT ON SANDY SOILS WITHIN THE DZUNBAYAN OIL FIELD (EASTERN MONGOLIA)

L. A. Garetova^{a,#}, G. V. Kharitonova^a, and E. L. Imranova^a

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

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

The data are presented on the particle-size distribution, content of hydrocarbons, *n*-alkanes in their composition and the number of microorganisms in the soils of Dzunbayan oil production area (Mongolia, the Eastern Gobi desert steppe). The soils studied are characterized by the dominance of sand and fluid fraction (99.50–99.8%) with particles of 2–20 μm. The soils show alkaline reaction (pH 8.2–8.7), they are slightly saline in the control areas and highly saline (water extract salinity 0.13–2.34‰) near the production well. The content of petroleum hydrocarbons (HC) in soils of the study area varied from 9 to 60 mg/kg, with a maximum near the well. The study of the molecular composition of *n*-alkanes revealed the dominance of long-chain homologues (66.3–79.2% of the total *n*-alkanes), occurring at various stages of physicochemical and microbiological weathering. According to a number of features, the microbial community of soils is characterized by a high degree of adaptation to the conditions of the arid zone, salinity, and high pH values; at the same time, these conditions limit the development of typical representatives of soil microbiocenoses, i.e., actinomycetes and, to a greater extent, microscopic fungi. The total number of heterotrophic bacteria (HBGs) in the studied soil samples varied within 1.22–3.49 million CFU/g of soil. The proportion of oil-oxidizing bacteria (NOB) was 12.6–18.9% OBA, which corresponded to the high adaptive capacity of the community to hydrocarbons. Specific climatic conditions, features of soil composition, as well as oil with a predominance of heavy paraffin fractions of the Dzunbayan deposit, characterize the low potential ability of soils to self-purify under the oil pollution.

Keywords: *Mongolia, soils, oil production, particle-size distribution, salinity, contamination, hydrocarbons, n-alkanes, bacteria*

REFERENCES

1. Andreeva, T.A. *Integral'naya otsenka vozdeistviya neftyanogo zagryazneniya na parametry khimicheskogo i biologicheskogo sostoyaniya pochv taezhnoi zony Zapadnoi Sibiri*. [Integral assessment of the oil pollution impact on the parameters of chemical and biological state of soils in the taiga zone of Western Siberia]. Extended Abstract of Cand. Sci. (Biol.) Diss., Tomsk, 2005, 24 p. (in Russian)
2. Bazilevich, N.I., Pankova, E.I. *Opyt klassifikatsii pochv po sodержaniyu toksichnykh soley i ionov* [Experience in soil classification by the content of toxic salts and ions]. *Byulleten' Pochvennogo instituta im. V.V. Dokuchaeva*. 1972, vol. 5. pp. 36–49 (in Russian)
3. Vodyanova, M.L. *Ekologo-gigienicheskaya otsenka sposobov bioremediatsii neftezagryaznennykh pochv selitebnykh territorii* [Ecological and hygienic assessment of bioremediation methods of oil-contaminated soils in residential areas]. Extended Abstract of Cand. Sci. (Biol.) Diss., Moscow, 2013, 26 p. (in Russian)
4. Gennadiev, A.N., Zavgorodnyaya, Yu.A., Pikovskii, Yu.I., Smirnova, M.A. *Alkany kak komponenty uglevodorodnogo sostoyaniya pochv: povedenie, indikatsionnoe znachenie* [Alkanes as components of the hydrocarbon state of soils: behavior, indicative value]. *Pochvovedenie*, 2018, no. 1, pp. 37–47. (in Russian)
5. Gerasimov, I.P., Nogina, N.A., Dorzhgotov, D. *Pochvennyi pokrov i pochvy Mongolii*. [Soil cover and soils of Mongolia]. Moscow, Nauka Publ., 1984, 194 p. (in Russian)
6. Gerasimova, M.I., Stroganova, M.N., Mozharova, N.V., Prokof'eva, T.V. *Antropogennye pochvy (genesis, geografiya, rekultivatsiya)* [Anthropogenic soils (genesis, geography, and reclamation)]. Smolensk, Ecumene Publ., 2003, 268 p. (in Russian)
7. *GOST 17.4.3.01-2017. Mezhgosudarstvennyi standart. Okhana prirody. Pochvy. Obshchie trebovaniya k otboru prob.* [State Standard 17.4.3.01–2017. Interstate standard. Nature conservation. Soil. General requirements for sampling]. Moscow, Standartinform Publ., 2018. 8 p. (in Russian)
8. Dorokhova, M.F., Solntseva, N.P. *Ekspierimental'nye issledovaniya protsessov migratsii nefiti v pochvakh Kaliningradskoi oblasti* [Experimental studies of oil migration processes in soils of the Kaliningrad region]. In: *Geokhimiya landshaftov i geografiya pochv. 100 let so dnya rozhdeniya M.A. Glazovskoi* [Geochemistry of landscapes and geography of soils. 100-year birthday of M.A. Glazovskaya], Moscow, APR Publ., 2012, pp. 259–276. (in Russian)
9. Zamotaev, I.V., Ivanov, I.V., Mikheev, P.V., Nikonova, A.N. *Khimicheskoe zagryaznenie i transformatsiya pochv v raionakh dobychi uglevodorodnogo syr'ya (obzor literatury)* [Chemical pollution and transformation of soils in areas of hydrocarbon production (review of publications)]. *Pochvovedenie*, 2015, no. 12, pp. 1505–1518. (in Russian)
10. Zvyagintsev, D.G., Guzev, V.S., Levin, S.V., Seletskii, G.I., Oborin, A.A. *Diagnosticheskie priznaki razlichnykh urovnei zagryazneniya pochvy neftyu* [Diagnostic signs of different levels of oil contamination of the soil]. *Pochvovedenie*, 1989, no. 1, pp. 72–78. (in Russian)
11. Zvyagintsev, D.G., Zenova, G.M., Gracheva, T.A., Kurapova, A.I., Dubrova, M.S. *Raznoobrazie pochvennykh aktinomitsetnykh kompleksov, obuslovlennoe temperaturnymi adaptatsiyami mitselial'nykh aktinobakterii* [Diversity of soil actinomycete complexes due to temperature adaptations of mycelial actinobacteria]. *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya*, 2011, no. 1, pp. 4–23. (in Russian)
12. Zvyagintsev, D.G., Umarov, M.M., Chernov, I.Yu., Lysak, L.V., et al. *Mikrobnye soobshchestva i ikh funktsionirovanie v protsessakh degradatsii i samovosstanovleniya pochv* [Microbial communities and their functioning upon degradation and self-rehabilitation of soils]. In: *Degradatsiya i okhrana pochv* [Degradation and protection of soils], Moscow, MSU Publ., 2002, pp. 401–454. (in Russian)
13. Kachinskii, V.L., Zavgorodnyaya, Yu.A., Gennadiev, A.N. *Uglevodorodnoe zagryaznenie arktotundrovnykh pochv ostrova Bol'shoi Lyakhovskii (Novosibirskie ostrova)* [Hydrocarbon pollution of Arctic tundra soils of Bolshoi Lyakhovskii Island (Novosibirsk Islands)]. *Pochvovedenie*, 2014, no. 2, pp. 155–168. (in Russian)
14. Kuznetszova, I.A., Dzyuban, A.N., Kosolapov, D.B. *Mikrobiologicheskie protsessy v donnykh otlozheniyakh vodoemov basseina Verkhnei Volgi i ikh rol' v formirovanii kachestva vodnoi sredy* [Microbiological processes in bottom sediments of reservoirs of the Upper Volga basin and their role in the formation of the aquatic environment quality]. In: *Sovremennye problemy biologii i khimii* [Modern problems in biology and chemistry]. Yaroslavl, Yaroslavl State University Publ., 2000, pp. 55–59. (in Russian)
15. Kurakov, A.V., Il'inskii, V.V., Kotelevtsev, S.V., Sadchikov, A.P. *Bioindikatsiya i reabilitatsiya ekosistem pri neftyanykh zagryaznennykh* [Bioindication and rehabilitation of ecosystems in oil pollution]. Moscow, Graphon Publ., 2006, 336 p. (in Russian)
16. Lisovitskaya, O.V., Mozharova, N.V. *Vliyanie uglevodorodnogo zagryazneniya na nakoplenie lipidov v pochvakh* [The effect of hydrocarbon pollution on the accumulation of lipids in soils]. *Pochvovedenie*, 2013, no. 6, pp. 755–760. (in Russian)
17. Oborin, A.A., Khmurchik, V.T., Ilarionov, S.A., Markarova, M.Yu., Nazarov, A.V. *Neftezagryaznennyye biogeotsenozy (protsessy obrazovaniya, nauchnye osnovy vosstanovleniya, mediko-ekologicheskie problemy)* [Oil-contaminated biogeocenoses (education processes, scientific foundations of restoration, medical and environmental problems)]. Perm, PSU Publ., PSTU Publ., 2008, 511 p. (in Russian)
18. Pankova, E.I. *Zasolenie pochv Mongolii* [Salinization of soils in Mongolia]. *Pochvovedenie*, 1986, no. 10, pp. 81–90. (in Russian)
19. Patin, S.A. *Neft' i ekologiya kontinental'nogo shel'fa* [Oil and ecology of the continental shelf]. Moscow, VNIRO Publ., 2001, 247 p. (in Russian)
20. Permitina, V.N. *Transformatsiya pochv neftepromyslov Prikaspiiskogo regiona* [Transformation of soils of oil

- fields of the Caspian region]. *Pochvovedenie i agrokhi-miya*, 2011, no. 2, pp. 20–29. (in Russian)
21. Pikovskii, Yu.I. *Geokhimicheskie osobennosti tekhnogennykh potokov v raionakh nefte dobychi* [Geochemical features of technogenic flows in oil production areas]. In: *Tekhnogennye potoki veshchestva v landshaftakh i sostoyanie ekosistem* [Technogenic flows of matter in landscapes and the state of ecosystems]. Moscow, Nauka Publ., 1981, pp. 134–148. (in Russian)
 22. Pikovskii, Yu.I. *Prirodnye i tekhnogennye potoki uglevodorodov v okruzhayushchei srede* [Natural and anthropogenic hydrocarbon flows in the environment]. Moscow, MSU Publ., 1993, 207 p. (in Russian)
 23. Pikovskii, Yu.I., Gennadiev, A.N., Krasnopeeva, A.A., Puzanova, T.A. *Uglevodorodnye geokhimicheskie polya v pochvakh raiona nefryanogo promysla* [Hydrocarbon geochemical fields in the soils of the oil field area]. *Vestn. Mosk. Un-ta. Ser. 5, geografiya*, 2009, no. 5, pp. 28–33. (in Russian)
 24. Pikovskii, Yu.I., Gennadiev, A.N., Krasnopeeva, A.A., Puzanova, T.A. *Prirodnye i tekhnogennye uglevodorodnye geokhimicheskie polya v pochvakh: kontseptsiya, tipologiya, indikatsionnoe znachenie* [Natural and technogenic hydrocarbon geochemical fields in soils: concept, typology, and indicative value]. In: *Geokhimiya landshaftov i geografiya pochv. 100 let so dnyarozhdeniya M.A. Glazovskoi* [Geochemistry of landscapes and geography of soils. 100th anniversary of M.A. Glazovskaya]. Moscow, APR Publ., 2012, pp. 236–258. (in Russian)
 25. Pikovskii, Yu.I., Ismailov, N.M., Dorokhova, M.F. *Neftegazovaya geoekologiya – nauka XXI veka* [Oil and gas geoecology as the science of the XXI century]. *Geopolitika i ekogeodinamika regionov*, 2014, vol. 10, no. 2, pp. 56–62. (in Russian)
 26. *PND F 16.1:2.2.22–98. Metodika vypolneniya izmerenii massovoi doli nefteproduktov v mineral'nykh, organogennykh, organo-mineral'nykh pochvakh i donnykh otlozheniyakh metodom IK-spektrometrii* [Technique for measuring the mass fraction of petroleum products in mineral, organogenic, organo-mineral soils and bottom sediments using IR spectrometry]. Moscow, State Com. RF on environmental protection, 2005, 21 p. (in Russian)
 27. *Praktikum po mikrobiologii: uchebnoe posobie dlya studentov vuzov* [Workshop on microbiology: the textbook for students of higher education]. Ed. A.I. Netrusov, Moscow, Academiya Publ., 2005, 608 p. (in Russian)
 28. Rogozina, E.A., Shimanskii, V.K. *Nekotorye teoreticheskie aspekty vosstanovleniya neftezagryaznennykh pochvennykh ekosistem* [Some theoretical aspects of restoring oil-contaminated soil ecosystems]. *Neftegazovaya geologiya. Teoriya i praktika*, 2007, no. 2, pp. 1–16. (in Russian)
 29. Timergazina, I.F., Perexodova, L.S. *K probleme biologicheskogo okisleniya nefiti i nefteproduktov uglevodorodokislyayushchimi mikroorganizmami* [On the problem of biological oxidation of oil and petroleum products by hydrocarbon-oxidizing microorganisms]. *Neftegazovaya geologiya. Teoriya i praktika*, 2012, vol. 7, no. 1, p. 15. (in Russian)
 30. Trofimov, S.Ya., Prokhorov, A.N. *Razrabotka normativov dopustimogo ostatochnogo soderzhaniya nefiti v pochvakh* [Development of standards for permissible residual oil content in soils]. *Ekologiya proizvodstva*, 2006, no. 10, pp. 30–37. (in Russian)
 31. Trofimov, S.Ya., Rozanova, M.S. *Izmenenie svoystv pochv pod vliyaniem nefryanogo zagryazneniya* [Changing soil properties under the influence of oil pollution]. *Degradatsiya i okhrana pochv* [Soil degradation and protection], Moscow, MSU Publ., 2002, pp. 359–373. (in Russian)
 32. Uvarova, V.I. *Sovremennoe sostoyanie kachestva vody r. Obi v predelakh Tyumenskoi Tyumenskoi oblasti* [The current state of water quality of the Ob River within the Tyumen region]. *Vestnik ekologii, lesovedeniya i landshaftovedeniya*, 2000, no. 1, pp. 18–26. (in Russian)
 33. Fokina, L.M. *Formirovanie prirodno-tekhnogennykh sistem neftegazovykh kompleksov. Kompleksnyi monitoring i optimal'nye tekhnologii minimizatsii ekologicheskogo ushherba* [Formation of natural and man-made systems of oil and gas complexes. Comprehensive monitoring and optimal technologies for minimizing environmental damage]. Extended Abstract of Doctoral (Geol.-Min.) Dissertation, Tyumen, 2007, 38 p. (in Russian)
 34. Chizhikova, G.P. *Mineralogicheskii sostav ilistoi fraktsii pustynnykh pochv Mongolii* [Mineralogical composition of silty fraction of desert soils of Mongolia]. *Pochvovedenie*, 1988, no. 8, pp. 44–55. (in Russian)
 35. Xongorzul B. *Osobennosti sostava uglevodorodov i vysokomolekulyarnykh soedinenii vysokoparaffinistykh neftei Mongolii* [Features of the composition of hydrocarbons and high-molecular compounds of high-paraffin oils of Mongolia]. Extended Abstract of Cand. Sci. (Chem.) Dissertation, Tomsk, 2008, 23 p. (in Russian)
 36. Aislabie, J., Foght, J.M. Response of polar soil bacterial communities to fuel spills. *Polar microbiology: the ecology, biodiversity and bioremediation potential of microorganisms in extremely cold environments*, 2009, pp. 215–227.
 37. Atlas, R.M. Microbial hydrocarbon degradation–bioremediation of oil spills. *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, 1991, vol. 52, no. 2, pp. 149–156.
 38. Batjargal, Z. Desertification in Mongolia, RALA Report № 200, RALA, Reykjavik, 1992, pp. 107–113.
 39. Batukaev, A.A., Endovitsky, A.P., Andreev, A.G., Kalinichenko, V.P., et al. Ion association in water solution of soil and vadose zone of chestnut saline solonetz as a driver of terrestrial carbon sink. *Solid Earth.*, 2016, vol. 7, no. 2, pp. 415–423.
 40. Del'Arco, J.P., De Franca, F.P. Influence of oil contamination levels on hydrocarbon biodegradation in sandy sediment. *Environm. Pollution*, 2001, vol. 112, no. 3, pp. 515–519.
 41. Endovitsky, A.P., Kalinichenko, V.P., Mischenko, N.A., Batukaev, A.A., et al. Ions association in soil solution as the cause of lead mobility and availability after application of phosphogypsum to chernozem. *Journal of Geochemical Exploration*, 2017, vol. 182, pp. 185–192.
 42. Harayama, S., Kasai, Y., Hara, A. Microbial communities in oil contaminated seawater. *Curr. Opin. Biotechnol.*, 2004, vol. 15, no. 3, pp. 205–214.

43. Hockun, K., Mollenhauer, G., Ho, S.L., Hefter, J., Ohlendorf, C., Zolitschka, B., Mayr, C., Lücke, A., Schefuß, E. Using distributions and stable isotopes of n-alkanes to disentangle organic matter contributions to sediments of Laguna Potrok Aike, Argentina. *Organic Geochemistry*, 2016, vol. 102, pp. 110–119.
44. Johnstone, J.F., Kokelj, S.V. Environmental conditions and vegetation recovery at abandoned drilling mudsumps in the Mackenzie Delta region, Northwest Territories, Canada. *Arctic*, 2008, vol. 61, no. 2, pp. 199–211.
45. Peters, K.E., Walters, C.C., Moldowan, J.M. The biomarker guide: Vol. 2, Biomarkers and isotopes in petroleum systems and Earth History. Cambridge University Press., 2007, 704 p.
46. Yamanaka, T., Kaihotsu, I., Oyunbaatar, D., Ganbold, T. Summertime soil hydrological cycle and surface energy balance on the Mongolian steppe. *Journal of Arid Environments*, 2007, vol. 69, pp. 65–79.
47. Yuting, L., Guanghe, L., Van Nostrand, J.D., Zhili, H., et al. Microarray based analysis of microbial functional diversity along an oil contamination gradient in oil field. *FEMS Microbiol Ecol.*, 2009, no. 70, pp. 324–333.

ЗАГРЯЗНЕНИЕ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

УДК 550.424.6

ФОНОВЫЕ ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ НА ТЕРРИТОРИИ ЭЛЬКОНСКОГО УРАНОВОРУДНОГО РАЙОНА

© 2023 г. М. О. Миронова^{1,*}

¹Московский филиал ФГБУ «ВСЕГЕИ»,
ул. Маршала Тухачевского, 32, корп. «А», Москва, 123154 Россия

*E-mail: tomirono@yandex.ru

Поступила в редакцию 22.12.2022 г.

После доработки 24.05.2023 г.

Принята к публикации 09.06.2023 г.

Эльконский урановорудный район, расположенный в южной части Якутии, обладает богатейшими запасами урановой руды. Руды отличаются сложным комплексным составом, основным компонентом является браннерит. Несмотря на длительную историю изучения, до недавнего времени месторождения не разрабатывались. Представленное исследование базируется на данных, полученных непосредственно перед началом активного освоения, и призвано зафиксировать исходное состояние природной среды. Изучено содержание основных элементов и важнейших радионуклидов в почвах (рыхлых поверхностных отложениях), растительности и поверхностных водах, выявлены местные особенности их распределения по ландшафтам, зафиксированы превышения содержания, связанные с природными процессами (формирование вторичных ореолов выветривания) и техногенными нарушениями вследствие проведения геологоразведочных работ.

Ключевые слова: геоэкология, геохимия, Эльконский урановорудный район, фоновые исследования

DOI: 10.31857/S0869780923040069, **EDN:** PPGVBZ

ВВЕДЕНИЕ

С 1990-х годов потребление урана устойчиво опережает добычу, и на производство идут накопленные ранее запасы. Для России в 2005 г. природный уран удовлетворял только пятую часть потребностей российских реакторов и экспорта тепловыделяющих сборок и низкообогащенного урана. Когда в 2007 г. на мировом рынке резко выросли спотовые цены на уран, было принято решение начать разрабатывать урановые месторождения, ранее отнесенные к резервным. К их числу относятся месторождения Эльконского урановорудного района (ЭУР) в Южной Якутии. В районе исследованы крупнейшие запасы урана (разведанные 345 тыс. т, прогнозные до 300 тыс. т [8]), добыча которых в свое время была признана нерентабельной из-за бедности руд, их сложного состава и большой глубины залегания.

В современных условиях любая хозяйственная деятельность должна вестись на принципах сохранения природной среды. Знание начальных условий позволяет оценивать антропогенные изменения, их направление и величину и помогает при ведении мониторинга.

Цель представляемой работы — охарактеризовать исходные геоэкологические условия Эльконского урановорудного района на основе полевых

исследований, проведенных до начала освоения месторождений.

ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ

ЭУР локализован в пределах Эльконского горста Алданского плоскогорья — части Алдано-Станового щита Сибирской платформы. Несмотря на то что Алданский горнопромышленный район привлекал внимание геологов с начала XX в., в хозяйственном отношении территория освоена слабо — до г. Томмот, ближайшего населенного пункта, расстояние больше 20 км.

Местность представляет собой среднегорье с абсолютными высотами до 1449 м и относительными превышениями до 500–700 м. Современный рельеф сформирован длительной денудацией в условиях умеренного вздымания территории и имеет высокую степень расчлененности. Водоразделы узкие, участками гребневидные; склоны речных долин характеризуются высокой крутизной (до 35–45°). На рис. 1 показана гипсометрическая карта местности и три месторождения, с которых планировалось начинать освоение ЭУР: Дружное, Курунг, Эльконское плато — которые и стали объектами изучения.

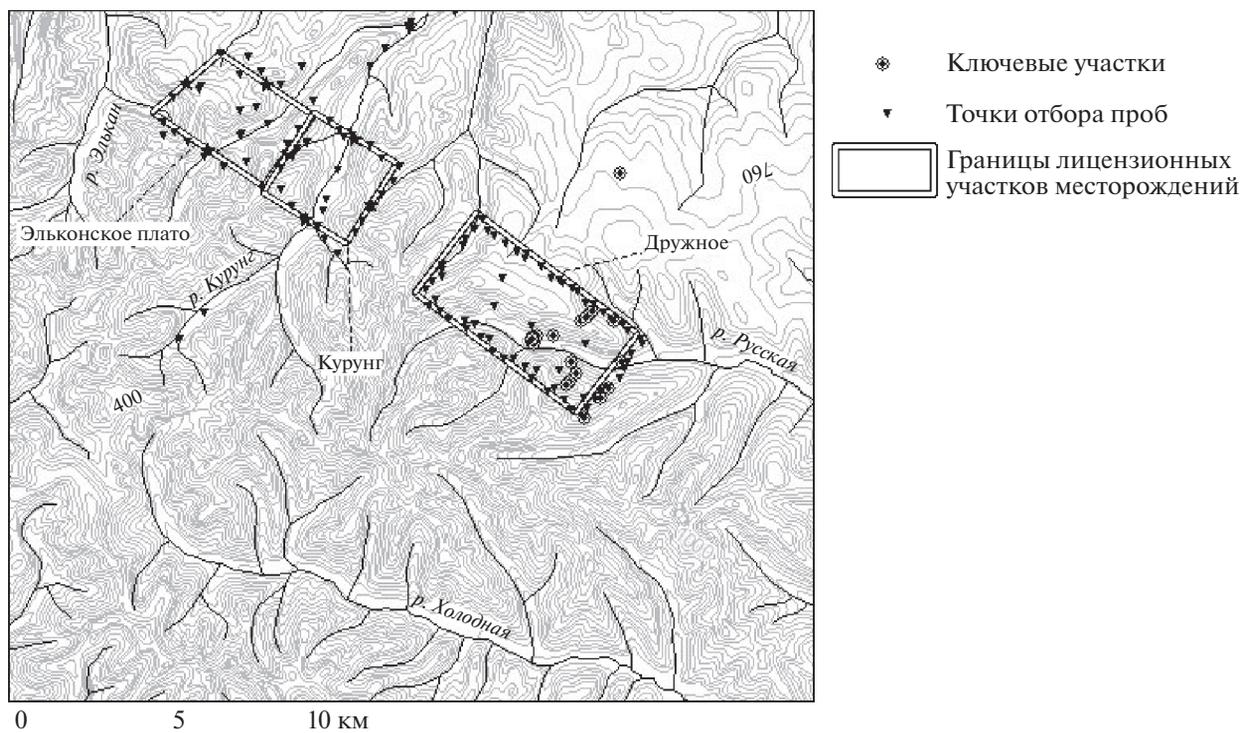


Рис. 1. Карта фактического материала.

На поверхность здесь выходят древние породы фундамента, существенно меньшую площадь составляют отпрепарированные выходы интрузивов – даек и пластовых тел протерозойского, юрского и мелового возраста, юрских силлов и лакколитов. Более молодые породы представлены только четвертичными образованиями – аллювием рек Русская и Холодная – и обнаруживаются сильно восточнее и южнее изучаемого участка ЭУР. Щит разбит древними же разломами, омоложенными во время мезозойской активизации. К мезозойскому времени, когда сформировался Эльконский горст, относятся проявления щелочного магматизма, с ним связано формирование руд урана и золота [2, 8, 9].

Важнейшими особенностями рудных тел являются форма нахождения урана в виде браннерита (титаната урана) и уникальные приразломные предрудные золотосодержащие пирит-карбонат-калиевошпатовые метасоматиты. Помимо урана, планируется извлечение золота; прорабатываются планы добычи других металлов, в первую очередь, молибдена и серебра. Бедность руд, сложный состав, большая глубина залегания и геологическое строение определяют в качестве наиболее подходящего метода отработки подземное кислотное выщелачивание.

Для региона характерен резко континентальный климат, с длительной холодной зимой и коротким жарким летом. При значительных суточных и годовых амплитудах среднегодовая темпе-

ратура воздуха составляет от -3.5 до -6.2°C , что обуславливает широкое развитие многолетне-мерзлых пород (ММП). Их мощность доходит до 200–400 м, летнее оттаивание – от 0.5 до 3 м. Поверхностные воды гидрокарбонатные кальциево-магниевого, ультрапресные. Типичные ландшафты – среднегорная лиственничная тайга на слабо-развитых почвах мерзлотного ряда [4, 5, 15, 16].

Постепенное разрушение рудных тел и миграция элементов обуславливают формирование геохимических и, в данном случае, радиохимических аномалий. По литературным данным, в пределах изучаемой территории контрастных геохимических аномалий не наблюдается, однако есть радиоактивные точечные аномалии, отнесенные к природным [6].

Исследования последних лет, появившиеся после принятия принципиального решения о начале разработки месторождений ЭУР [6, 7, 14], указывают на обнаружение локально сильно загрязненных участков. Отмечают существование нерекультивированных скважин [14], отвалов (в том числе без гидроизоляции), шурфов, шахт, штолен, пройденных в ходе геологоразведочных работ 1960–1980-х гг. [11].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Состояние природной среды в целом описывается как совокупность состояний ее компонентов. В представляемое исследование включены

компоненты геологической среды из зоны гипергенеза: почвы (почвообразующие, подстилающие породы), поверхностные воды и растительность.

Для характеристики территории использовался метод ландшафтного картографирования. Полевые исследования позволили описать и оконтурить типичные виды ландшафтов ЭУР. Также были проведены дешифрирование космических снимков и анализ гипсометрических и геологических карт. Поскольку все результаты имели географическую привязку, их хранение и обработка проходили с использованием геоинформационных технологий.

Полевые исследования проводились в 2007–2008 гг. (сразу после принятия принципиального решения о начале освоения месторождений, но до начала проведения технических работ) совместными экспедициями специалистов ФГУП “Ведущий научно-исследовательский институт химической технологии” (ФГУП “ВНИИХТ”) и Якутского государственного университета им. М.К. Амосова (ЯГУ). Изучаемыми компонентами природной среды были: геологическое строение, рельеф, почвы, поверхностные воды, растительный, животный мир, атмосферный воздух. В ходе работ были выделены и описаны ключевые участки (элементарные ландшафты ЭУР), определены их расположение и распространенность; проведены непосредственные радиоэкологические измерения (мощность дозы, концентрация радона в воздухе) и отбор проб для лабораторных анализов.

Ключевые участки выбирались сравнительно-географическим методом (по состоянию растительных сообществ, почв, с учетом рельефа, экспозиции склона, абсолютной высоты, антропогенных изменений) по профилю через долину р. Русская на территории месторождения “Дружное”. На ключевых участках были сделаны лесоводственно-геоботанические описания с закладкой пробных площадей. Определялись проективное покрытие ярусов растительности, возраст компонентов сообществ, видовой состав, обилие, встречаемость и характер размещения растений.

Пробы почв и растительности отбирались по периметру лицензионных участков месторождений на расстоянии 300–500 м (в зависимости от степени расчленения рельефа), в их центрах (на удалении 1–1.5 км от других точек опробования) и на ключевых участках. Отбор почвенных проб проводился в местах с отсутствием признаков смыва или намыва поверхностного слоя, предпочтительно в местах с протяженностью задернения не менее 5 м. Для верхнего слоя почв подсчитывалась и площадь взятия образца для определения поверхностного загрязнения местности долгоживущими искусственными радионуклидами (в единицах Бк/м²). Оказалось, что в местных усло-

виях на большей части территории в качестве проб почвы можно отобрать только верхний 10-сантиметровый слой растительности и гумуса, поскольку ниже залегает каменисто-песчаная смесь без глинистой фракции.

Пробы поверхностных вод отбирались у истоков ручьев, в местах слияния, в местах выхода на границу лицензионных участков месторождений.

Координаты ключевых участков и точек пробоотбора определялись по gps-приемникам. В результате было выделено 15 ключевых участков, проведен отбор и анализ проб в 97 точках.

Определение содержания металлов в твердых и жидких пробах проводилось методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой; части металлов и полуметаллов (Be, V, As, Tl, Bi, Th, U и др.) – методом масс-спектрографии; анионов (NO_2^- , NO_3^- , Cl^- , F^- , SO_4^{2-} , PO_4^{3-}) в пробах почв в водорастворимой форме – методом ионной хроматографии. Для урановых месторождений ко всему комплексу воздействий, которые характерны для объектов добычи полезных ископаемых, прибавляется радиационное воздействие. В пробах при радиохимической пробоподготовке определялись: методом бета-радиометрии – ^{90}Sr , методом альфаспектрометрии – ^{239}Pu . Для гамма-спектрометрического анализа ^{210}Pb , ^{230}Th , ^{228}Th , ^{226}Ra , ^{228}Ra , ^{137}Cs , ^{40}K , ^{210}Po , ^{238}U использовались автоматизированный спектрометр СЭГ-1П (НПЦ “Аспект”), спектрометр Гамма-1П № 040 и альфа-спектрометр СЭА-13П или альфа-бета радиометр УМФ-2000.

Полученный в результате полевых и лабораторных исследований массив информации характеризует состояние поверхностных вод, почв, растительности до начала освоения месторождений.

Геохимические аномалии определялись сравнительно-оценочным методом. В качестве точки отсчета использованы кларки (К) – средние содержания элементов в литосфере, по А.П. Виноградову в весовых процентах [3]. Отношение определенного содержания элемента к его кларку (кларк концентрации, Кк) характеризует распределение элемента, его накопление и миграционную способность в местных условиях.

Отдельным объектом изучения стали геохимические особенности древних пород щита в пределах ЭУР. Их элювий и делювий являются и почвообразующими, и подстилающими породами. По геологической карте [4, 5, 15, 16] их всего четыре (в порядке распространенности на изучаемой территории):

1. γPR_1 , $\gamma\text{-gnPR}_1$ Ранний протерозой. Каменно-плутонический комплекс лейкогранитовый. Граниты нерасчлененные. Мигматит-плуто-

Таблица 1. Формулы геохимической специализации

Исходные породы	По результатам полевых исследований	По данным геохимического картирования листа О–52 [6]
$\gamma PR_1, \gamma\text{-gn}PR_1$	$\frac{L_{25}C_{35}X_{40}}{C_9X_{15}L_{76}}$	$\frac{X_{50}C_{50}}{X_{25}C_{50}}$
$AR_{2?}lg$	$\frac{L_{19}C_{30}X_{51}}{X_7C_{15}L_{78}}$	$\frac{X_{100}}{C_{17}X_{29}L_{54}}$
$AR_{2?}md$	$\frac{L_{25}C_{37}X_{38}}{X_7C_{14}L_{79}}$	
$AR_1?vs$	$\frac{L_{15}C_{34}X_{51}}{X_8C_{14}L_{78}}$	

ны гранитов (амфиболовых, биотитовых, биотит-гранатовых) гнейсовидных, гранито-гнейсов.

2. $AR_{2?}lg$. Поздний архей. Федоровская серия. Леглиерская свита. Плаггиосланцы и плаггиогнейсы диопсид-роговообманковые, двупироксен-роговообманковые, прослой плаггиосланцев биотит-роговообманковых, биотит-гиперстеновых и роговообманковых, линзы кристаллосланцев флогопит-диопсидовых, скаполит-диопсидовых и кальцифиров.

3. $AR_{2?}md$. Поздний архей. Федоровская серия. Медведовская свита. Плаггиосланцы биотит-роговообманковые и двупироксен-роговообманковые, плаггиосланцы и плаггиогнейсы диопсид-роговообманковые, двупироксеновые, биотит-гиперстеновые, биотит-гиперстеновые, роговообманковые и роговообманково-диопсидовые, линзы диопсидовых кристаллосланцев и магнетит-флогопит-диопсидовых пород.

4. $AR_1?vs$. Ранний архей. Верхнеалданская серия. Васильевская свита. Плаггиогнейсы и плаггиосланцы биотитовые, гиперстеновые, иногда двупироксеновые и (или) амфиболсодержащие, прослой гнейсов и кристаллосланцев гранат-силламанит-кордиеритовых, линзы кварцитов и двупироксеновых плаггиогнейсов.

Для определения значимости вклада геологической составляющей в различие ландшафтов использована формула геохимической специализации. Ассоциация для группы накопления ($K_k > 1.5$) определяется как взвешенная сумма трех геохимических типов элементов по классификации В.М. Гольдшмита (литофильной (Л), халькофильной (Х) и сидерофильной (С)) в процентном выражении: сумма K_k всех химических элементов принималась за 100%. В формуле указывается вклад групп элементов, в процентах, по степени убывания. Для группы дефицита ($K_k < 0.7$) суммируются обратные величины K_k (кларки рассе-

яния). Индекс геохимических типов представлен в виде дроби: в числителе группы накопления, в знаменателе группы дефицита, например,

$$\frac{L_{25}C_{35}X_{40}}{C_9X_{15}L_{76}}$$

Проведение корреляционного анализа содержаний элементов и выявление ассоциаций сонахождения были затруднены из-за небольшого количества проб: проверка рядов значений элементов определений критерием хи-квадрат Пирсона показала, что они не являются выборками из нормального распределения. Поэтому использовался коэффициент корреляции Пирсона (коэффициент линейной корреляции) – отношение ковариации к произведению среднеквадратических отклонений.

Для оценки существующего загрязнения точкой отсчета выбраны предельно допустимые концентрации (ПДК). Для почв: ПДК_п – предельно допустимая концентрация химического вещества в пахотном слое почвы, значения взяты из [1]. Для вод: ПДК_в – предельно допустимая концентрация химического вещества в воде водоемов хозяйственно-питьевого водопользования [1] и СанПиН 2.1.4.1074-01. Для оценки уровня химического загрязнения почв использован показатель природной (или потенциальной) экологической опасности (ПЭО) – аналог суммарного показателя загрязнения Z_c для природных ландшафтов: сумма K_k элементов элементов I, II, III классов опасности, минус число элементов, участвующих в расчете без одного. Шкала для ПЭО используется та же, что и для Z_c : менее 16 – допустимые, 16–32 – умеренные, 32–128 – высокие, более 128 – очень высокие значения [10].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для изучения изменчивости, связанной с миграцией и накоплением элементов в почвообразующих породах, необходимо понять, насколько сильно различаются исходные подстилающие породы. Для этого была подсчитана формула геохимической специализации по пробам, соотношенным с четырьмя типами выделенных пород (табл. 1).

Полученные значения не имеют существенных различий между собой в группах накопления, только в группе дефицита отличаются мигматит-плутоны гранитов. Формула существенно отличается от информации, приводимой в литературных источниках, – что, вероятно, связано с различиями в масштабе исследования и охватом большей территории.

Для дальнейших же исследований сделан вывод, что геохимические различия между разными вариантами исходных пород значения не имеют.

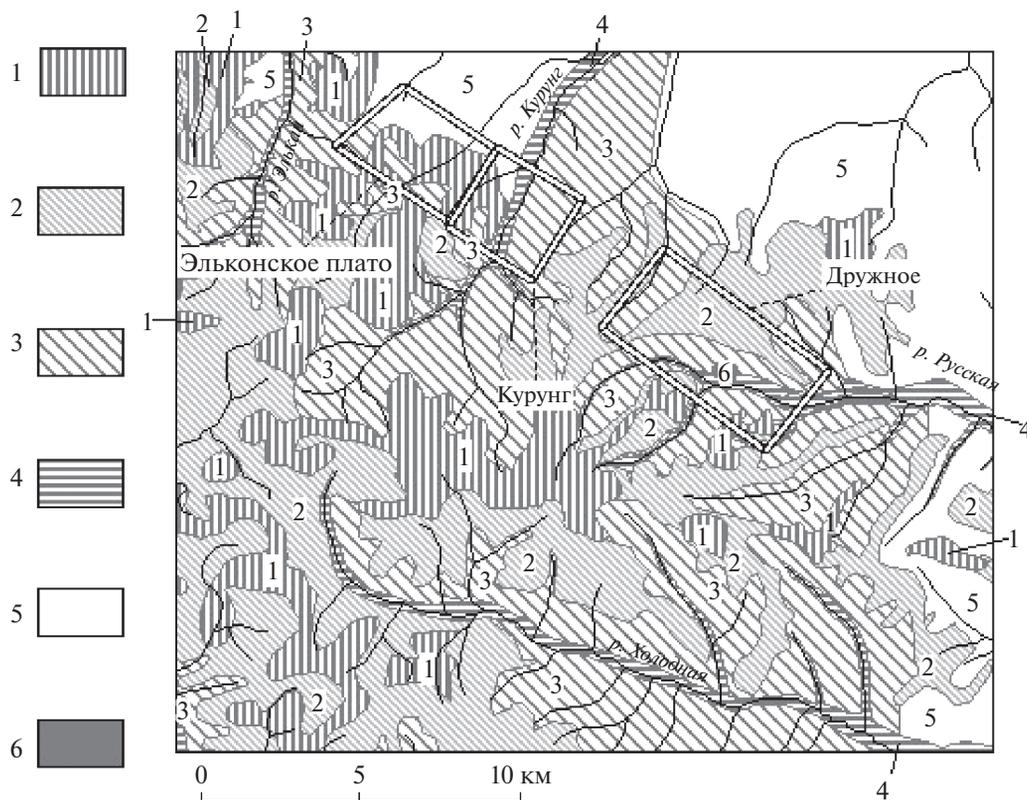


Рис. 2. Ландшафтная карта: 1 – вершинные денудационные ландшафты; 2 – крутые денудационные склоны; 3 – аккумулятивно-денудационные ландшафты нижних частей склонов; 4 – долинные ландшафты; 5 – зональные таяжные ландшафты; 6 – техногенно-измененные ландшафты.

Геохимическое единообразие пород особенно важно и потому что почвенный покров территории характеризуется незначительной мощностью почвенного профиля. По сути для большинства проб, отобранных как “почвенные”, правильнее было бы указывать пробы “рыхлых поверхностных отложений, в разной степени затронутых почвообразующими процессами”.

Изучение ключевых участков дало представление о том, что в растительности территории четко проявлена высотная поясность, биологические сообщества сменяются в зависимости от высоты на уровне моря и экспозиции склонов. По группам ландшафты могут быть разделены на (рис. 2):

– **денудационные** – с преобладанием криогенных и склоновых процессов:

– **вершины** (пологие склоны гор крутизной 10° – 20° на высотах 1300–1498 м), крутые склоны и осыпи: повсеместное распространение ММП мощностью до сотен метров; горные тундры, голыцы на примитивных неразвитых почвах, криоземах (знак 1 на рис. 2);

– **верхняя часть склонов** (на высотах 1200–1300 м; склоны средней крутизны (15° – 20° , до 40°), нагорные террасы); повсеместное развитие ММП, встречаются термокарстовые воронки; чередова-

ние горных тундр и криволесья (преимущественно с кедровым стлаником *Pinus pumila*) на криоземах, маломощных мерзлотно-подзолисто-глеевых, тундровых подбурях (знак 2 на рис. 2);

– **аккумулятивно-денудационные** (знак 3 на рис. 2) – залесенные нижние части склонов (склоны средней крутизны, нагорные террасы на высотах ниже 1200 м) с неглубоким и повсеместным залеганием ММП; лиственничные леса из лиственницы Каяндера (*Larix cajanderi*) с участками темнохвойных лесов на маломощных мерзлотно-подзолисто-глеевых, подзолистых иллювиально-гумусовых, горных подбурях; сосновые леса (*Pinus sylvestris*) на грубоскелетных подзолистых почвах (<5% территории); локально на коллювиальных террасах – глубокое залегание мерзлоты;

– **аккумулятивные** (знак 4 на рис. 2) – плоские поверхности межгорных понижений, днища речных долин на высотах до 1200 м, с глубоким залеганием ММП и сплошными таликами; пестрое чередование сообществ, увязанное с элементами рельефа; лиственные леса (береза, рябина, осина, ольха, черемуха) с кустарниковым подлеском, разнотравно-злаковые, пионерные сообщества,

болота – на соответствующих маломощных подзолистых, аллювиальных, болотных почвах.

В дальнейшем три выделенные группы будут указываться как вершинные, склоновые и долин-ные ландшафты.

Знания о расположении ландшафтов дают возможность изучить миграцию элементов. Она определялась сравнительно-оценочным методом: отличием средних значений для выделенной по какому-либо признаку группы проб от среднего по всем пробам территории.

При сравнении в рядах опробования “**все почвы – все растения**” обнаружено:

- относительное накопление в растительности Ca, Sr, Cu, Mo, Ba, ²³⁹Pu;
- относительное накопление в почвах Bi, Al, V, Fe, Cd, Ni, изотопов Ra, ²³⁸U;
- относительно пониженное содержание в растительности Bi, As, Pb, изотопов Ra;
- относительно пониженное содержание в почвах Zn, ²³⁹Pu.

Такие результаты означают, что для местных растений характерно накопление биофильных, а для почв – литофильных и сидерофильных элементов, что является ожидаемым и косвенно подтверждает отсутствие в результатах полевых исследований серьезных ошибок.

Изучение проб, разделенных по принадлежности к группе ландшафтов, позволяет изучить **миграцию по ландшафтному профилю**. Геохимическая специализация не показала значимых отличий в типах коренных пород, а значит, все горные ландшафты изучаемой территории можно разделить всего на три ранее названные группы и под-считать характерные для них значения.

Общее распределение элементов по ландшафтному профилю от вершин к долинам показывает в почвенных пробах снижение содержания V, Ca, Zn, Zr, Ni, As, рост содержания Si, изотопов Ra.

Распределение элементов в пробах растительности по ландшафтному профилю от вершин к долинам показывает падение содержания ²¹⁰Pb, ¹³⁷Cs, Mo, As, рост содержания Mg, Mn, Be, изотопов Ra.

Рассматривая более детально каждый элемент, следует отметить следующие особенности в их миграции и накоплении. Некоторые элементы (Al, Ba, Ca, Mg, Mn, Fe, V, Ni, Cr, Cd, Co, Hg, Cu, Zn, Zr, U) ведут себя согласно известным геохимическим правилам. Так, уран (U) – выщелоченный элемент, должен концентрироваться в депрессиях, в болотах на глеевом и сорбционном барьере (по [12]). Наблюдаемое содержание урана и его изотопов постепенно и растет от вершин к долинам как в почвенных, так и в растительных

пробах. Малоподвижный в местных условиях Al равномерно распределен по ландшафтам и не накапливается в растениях. Также равномерно распределенные Pb, Ba, Ca, Mg, Sr, Cu, но подвижные и дефицитные в местных условиях ведут себя как биофильные элементы. Самые высокие коэффициенты концентрации отмечены для Cu: в растительных пробах ее содержание почти в 2.5 раза выше, чем в усредненном значении.

Важно, что в поведении некоторых элементов проявились особенности, которые противоречили ожиданиям. Отметим, что выявленные несоответствия необходимо учитывать при дальнейшем изучении ЭУР:

- Стронций (Sr), по результатам химических анализов, ведет себя ожидаемо: обнаруживается его вынос в верхней части профиля, накопление в склоновых почвах и в растительности. Однако изучение активности радионуклида ⁹⁰Sr (привнесенного техногенного элемента) показывает преимущественное накопление именно в почвах, а не растительности – при аналогичной миграции в выделенных ландшафтах. Возможно, это связано со спецификой отбора растительных проб – различные части растений по-разному накапливают этот элемент.

- Мышьяк (As), который содержится в значительном количестве в рудных телах, однако его поведение противоречит описанному в литературных источниках. Он характеризуется как подвижный биофильный в местных условиях, однако в ходе исследований самые высокие его относительные концентрации были зафиксированы в почвах верхней части склонов. Можно предположить, что изначальное поступление его из горных пород (в слаборастворимых сульфидных формах) превышает возможности местных условий по окислению до подвижных форм (арсенатов).

- Поведение в ландшафтах сурьмы (Sb), которое, по некоторым литературным источникам [12], должно соответствовать As, на деле заметно отличается. Sb практически нет на водоразделах, значительная ее концентрация наблюдается в склоновых ландшафтах. Отмечается, что соединения сурьмы хорошо растворимы и активно мигрируют; вероятно, этим объясняется как вынос элемента с междуречий, так и из долинных ландшафтов.

- С торием (Th) ситуация обратная; из-за слабой миграционной способности следовало бы предположить его равномерное распределение, но по химическим анализам определено его относительное накопление в долинных ландшафтах. Вероятно, это связано с миграцией Th в составе органических комплексов с последующим накоплением в долинных (богатых гумусом) почвах. Изотопы ²²⁸Th и ²³⁰Th, являющиеся промежуточными членами рядов распада ²³²Th и ²³⁸U соответ-

Таблица 2. Значение коэффициента линейной корреляции для некоторых пар элементов, определенное в группе проб. Пропущены вычисления, где содержание элемента оказывалось ниже порога обнаружения

	Pb-Sr	Ca-Sr	Ti-Fe	Fe-V	Ni-U	As-Cr	Cu-Ba
Все пробы	-0.12	0.95	0.72	0.82	0.79	0.65	-0.12
Почвенные пробы	0.06	0.84	0.58	0.4	0.67	0.13	-0.72
Пробы растительности	0.3	0.98	0.93	1	0.92		0.58
Пробы кедрового стланика	0.26	0.67	0.96	0.99			0.56

ственно, тоже по-разному распределяются. Вероятно, их распределение определяется миграцией элементов, из которых сформировались данные изотопы. Однако эта версия требует дополнительного глубокого изучения и выходит за рамки данной работы.

- Непонятно преобладающее накопление хрома (Cr) в склоновых ландшафтах по сравнению с долинными, учитывая, что в местных условиях элемент мигрирует слабо и должен бы оседать в иллювиальных горизонтах — а значит, накапливаться не только в нижних частях склонов, но и в долинах. Возможно, это связано с тем, что в подавляющем большинстве точек пробоотбора из-за малой мощности профиля невозможно было разделить почвенные горизонты, и отбиралась только одна усредненная проба. В двух случаях, когда были отобраны пробы из разных горизонтов, подтверждается высокая концентрация Cr в гумусовом горизонте.

- Молибден (Mo), вопреки тому, что в гумидных ландшафтах описывается как слабо мигрирующий элемент, не создающий контрастной латеральной и радиальной дифференциации, показывает значительные отличия в содержании по ландшафтному профилю; вниз по склону его содержание уменьшается. Вероятной причиной можно назвать высокое содержание молибдена в местных горных породах, достигающее до промышленно значимых концентраций [2, 9], что вместе со слабой миграционной способностью и создает видимый эффект накопления (как и в случае с As). Исследование показало увеличение содержания в почвенных пробах тех месторождений, для которых характерно повышенное содержание Mo в рудах.

- Поступление из почвообразующих пород и закрепление в органическом веществе объясняет повышенное содержание в почвах вершин ^{40}K , хотя, как активный водный мигрант, он должен бы вымываться.

- Титан (Ti) — важный элемент в местных условиях: он образует браннерит, основное сырье для извлечения урана. В местных условиях он должен вести себя инертно [12], что в целом подтверждается и отсутствием накопления в растениях, и равномерным содержанием в склоновых и вершинных ландшафтах. Однако наблюдается

его накопление в долинных ландшафтах, на что следует обратить внимание.

- Количества проб со значимыми определениями висмута (Bi) оказалось недостаточно, чтобы делать выводы о распределении этого элемента — если не считать подтверждения его характеристики как редкого, рассеянного и небифильного.

- Невозможно проанализировать поведение олова (Sn), поскольку по результатам разных видов анализов видны противоположно направленные тенденции к его выносу и накоплению. К сожалению, в этом случае, в первую очередь, следует перепроверить исходные данные.

Рассмотрев в деталях поведение каждого отдельного элемента и сравнив их между собой, можно сделать предварительный вывод, что сформировать явные ассоциации сонахождения затруднительно. Чтобы подтвердить, действительно ли поведение схожих элементов сильно различается, для рядов значений содержаний каждой пары элементов было подсчитано значение коэффициента линейной корреляции: высокое положительное значение этого параметра указывает на совместное концентрирование элементов, обусловленное одним процессом; высокое отрицательное указывает на противоположное направление процессов. Примеры некоторых подсчитанных значений даны в табл. 2.

Даже без разбиения проб на группы высокие значения коэффициента (больше 0.9 по модулю) обнаруживаются у нескольких десятков пар элементопределений. Для почвенных проб их число возрастает до 89. Среди них есть и легко объяснимые (положительные для $^{230}\text{Th}-\text{Th}$, $^{230}\text{Th}-\text{U}$, Hg-Pb, отрицательные As-Ba), и на первый взгляд неочевидные (положительная Ni-U). Еще большее пространство для детального изучения представляют результаты сравнения растительных проб. Например, в паре Cu-Ba значения для почв отрицательные, а для растительных проб — положительные. В совокупности обнаружено меньшее количество пар с высокими значениями коэффициента линейной корреляции, но при отборе в качестве исходных данных более сходных проб (например, группы проб только кедрового стланика, только травы, только листьев) количество и состав сходных пар существенно изменяются (например, в пробах стланика уменьшается средство

пары Ca-Sr; для всех отборов растительных проб фиксируются пары Fe-V, As-Cr – причем первая фиксируется и для почвенных проб, а вторая – только в растительных). Известно, что растения разных видов и даже части растений по-разному накапливают отдельные элементы, и здесь видно подтверждение этого. Однако детальный разбор всех процессов биогенного накопления элементов выходит за пределы представляемой работы.

При сравнении выявленных корреляций для разных групп проб (растительность и почвы) можно отметить следующее:

- одинаковые процессы накопления: As-V, Be-Th (положительная);
- противоположно направленные: Pb-Sr (отрицательная для почв, положительная для растительности);
- не обнаруживают сходства либо не хватает данных (по имеющимся данным для растительности): Ca-Sr, Sr-Ba, Ba-Pb, Cr-Bi, Cr-As, Mn-Mo, As-Fe, As-Mo, Al-Ti, As-Ti, Bi-Ni, Be-U, Bi-Sn, U-Th, Fe-V.

ОЦЕНКА СУЩЕСТВУЮЩЕГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ

От выявления закономерностей миграции элементов следует перейти к рассмотрению аномалий, которые они формируют. При разработке месторождений новые техногенные геохимические ореолы будут накладываться на уже существующие. Поэтому необходимо определить, насколько значительно существующее загрязнение.

Его наличие легко заметно по анализам водных проб [13]. **Воды поверхностных водотоков** изучаемой местности должны быть пресными и ультрапресными, но отдельные пробы по мелким ручьям на территории месторождений показали существенное повышение минерализации. Самые большие значения минерализации характерны для вод самоизливающихся скважин, оставшихся нерекультивированными после проведения геологоразведочных работ. Для оценки загрязнения важно отметить, что сейчас воды в пределах территории лицензионных участков месторождений разбавляются до нормальных (т.е. характерных для региона ультрапресных).

Почвенные пробы ЭУР отличаются повышенными содержаниями Vi (Кк до 59); Co, Cd, Hg (до Кк > 20), As, Pb (до Кк > 10). Наблюдается локальное повышение содержания Mo в юго-восточной части изучаемой территории: обнаруженное увеличение значений в отобранных пробах соответствует повышению содержания этого элемента в рудах [2, 8, 9]. В некоторых случаях содержания Sb, Cl, Cu, U, Mn и Ni также значительно превышают кларковые значения. По кларкам концентраций видно, что основные превышения наблю-

даются для элементов, сложные сульфидные минералы которых сопутствуют браннериту (As, Pb, Hg, Cd).

Геохимические ассоциации элементов, которые составлены для всех точек измерения с Кк > 2, в основном представлены группировкой Vi, Hg, Pb, As в разных сочетаниях. В северо-западной части изучаемой территории добавляется Cd, Co, а южной – Mo.

Повышенные относительно кларковых чисел содержания элементов в некоторых случаях приводят к превышению установленных нормативов. Часто наблюдаются превышения ПДК_п по мышьяку и свинцу, в единичных случаях – марганца и ртути.

Суммарная оценка существующего загрязнения проводилась с использованием показателя природной (или потенциальной) опасности. Подсчитанные значения для каждой из точек измерений характеризуют уровень загрязненности почв как допустимый, в 7 случаях – умеренный (рис. 3).

Превышения значений в большинстве случаев нельзя объяснить влиянием антропогенных объектов (шахт, штолен, отвалов, дорог, жилых зон), поскольку точки опробования выбирались вне зоны видимой миграции поллютантов. Повышенные концентрации элементов в почвах и водах являются проявлением естественной геохимической аномалии – вторичного ореола рассеяния месторождений ЭУР. Важно, что аномальные участки выявлены во всех выделенных типах ландшафтов, и поэтому на имеющемся материале невозможно построить карту “природного загрязнения”.

ВЫВОДЫ

До начала активного освоения месторождений Эльконского урановорудного района были проведены исследования, целью которых стало изучение исходных геоэкологических условий.

Уточнены закономерности распределения химических элементов и отдельных радионуклидов по компонентам ландшафта; из несоответствия между фактическими и литературными данными описаны местные особенности для распределения по ландшафтам Sr, As, Th, Cr, Mo, Ti, ⁴⁰K.

Выявлено, что повышенное содержание в рудных телах As, Hg, Pb, Cu, Mo, U приводит к формированию литохимических аномалий этих элементов в почвах с превышением кларков; для Mn, As, Hg, Pb повышенные содержания иногда означают превышения ПДК в почвах. Существуют водные аномалии, возможно, техногенного происхождения, но они не выходят за пределы лицензионных участков месторождений. Существу-

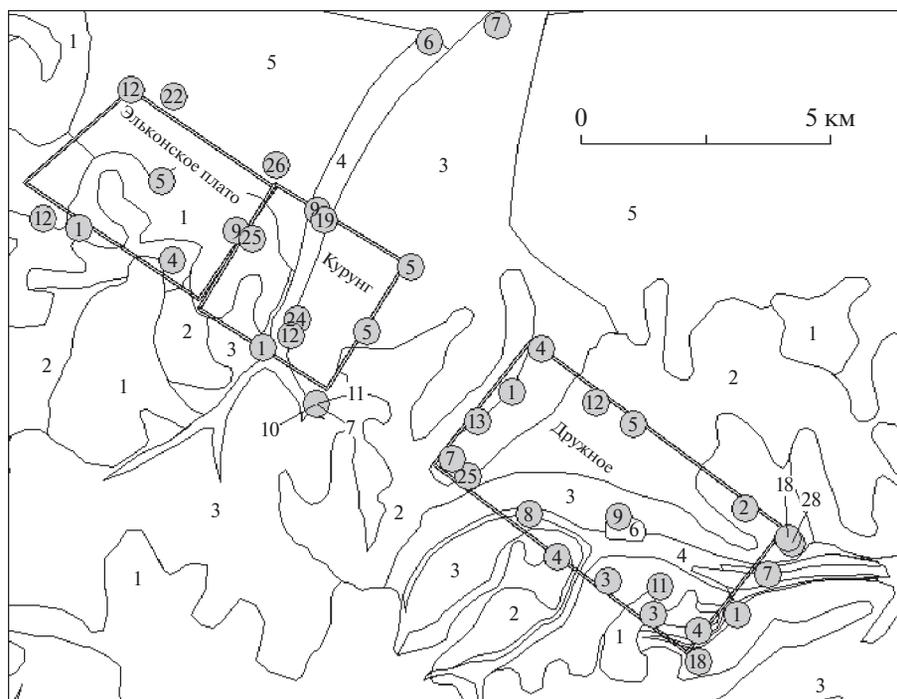


Рис. 3. Значения показателя природной (потенциальной) опасности (цифра в кружке); цифрами показаны индексы ландшафтов (см. рис. 2).

ющий общий уровень загрязнения территории по ПЭО – умеренный и допустимый.

Автор выражает благодарность сотрудникам ФГУП «ВНИИХТ» и Якутского государственного университета им. М.К. Амосова (ЯГУ) за предоставленные материалы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беспмятников Г.П., Кротов Ю.А. Предельно допустимые концентрации химических веществ в окружающей среде. Справочник. Л.: Химия, 1985. 528 с.
2. Бирка Г.И., Тарханов А.В., Меньшиков Ю.А., Никольский А.Л. и др. Природные типы руд месторождений Эльконского урановорудного района (Республика Саха-Якутия, Российская Федерация) // Уран на рубеже веков: природные ресурсы, производство, потребление. М.: ВИМС МПР, 2002. С. 226–236.
3. Виноградов А.П. Среднее содержание химических элементов в главных типах изверженных пород земной коры // Геохимия. 1962. № 7. С. 555–571.
4. Воробьев К.А., Курбатов А.В. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1 : 200 000. Изд. второе. Серия Алданская, лист О-51-ХП (Ниж. Куранах). М.: МФ ВСЕГЕИ, 2015.
5. Воробьев К.А., Шумбасова Г.А. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1 : 200 000. Изд. второе. Серия Алданская, лист О-51-ХVIII (Алдан). М.: МФ ВСЕГЕИ, 2013.
6. Геохимическая основа государственной геологической карты Российской Федерации М 1 : 1000000, лист О-52. М.: ИМГРЭ, 2007.
7. Голева Р.В. Об экологическом сопровождении проекта строительство Эльконского ГМК // Рациональное освоение недр. 2011. № 1. С. 61–65.
8. Машковцев Г.А., Константинов А.К., Мигута А.К., Шумилин М.В., Щеточкин В.Н. Уран российских недр. М.: ВИМС, 2010. 850 с.
9. Мигута А.К. Урановые месторождения Эльконского рудного района на Алданском щите // Геология рудных месторождений. 2001. Т. 43. № 2. С. 129–151.
10. Морозова И.А. Геохимические ландшафты и экологическая опасность // Сб. статей «Прикладная геохимия. Вып. 1. Геохимическое картирование». М.: ИМГРЭ, 2000. С. 122–134.
11. Павлова И.В., Домаренко В.А., Галактионов В.А., Журавлев В.Г. Прогнозирование природно-техногенных рисков в зоне влияния будущего Эльконского горнометаллургического комбината (Алданский щит, Республика Саха (Якутия)) // Разведка и охрана недр. 2019. № 12. С. 41–48.
12. Перельман А.И., Касимов Н.С. Геохимия ландшафта. М.: Астрей-2000, 1999. 768с.
13. Салова Т.А., Николаева Н.А. Гидрохимические и гидробиологические исследования воды рек Южной Якутии в зоне разработки Эльконского урано-

- во-рудного месторождения // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 5. С. 664.
14. Самсонов Б.Г. Основы объектного мониторинга геологической среды на предприятиях по разведке, добыче и использованию атомного сырья. М.: Центр содействия социально-экологическим инициативам атомной отрасли, 2010. 120 с.
 15. Утробин Д.В., Шевченко В.И. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1 : 200000. Изд. второе. Серия Алданская, лист О-52-VII (Томмот). М.: МФ ВСЕГЕИ, 2013.
 16. Утробин Д.В., Воробьев К.А. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1 : 200000. Изд. второе. Серия Алданская, лист О-52-XIII (Бллымах). М.: МФ ВСЕГЕИ, 2015.

BACKGROUND GEOECOLOGICAL CONDITIONS OF ELKON GOLD-URANIUM ORE REGION

M. O. Mironova^{a, #}

^a*Karpinsky All-Russia Geological Research Institute, Moscow branch, ul. Marshala Tukhachevskogo 31a, Moscow, 123154 Russia*

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

The Elkon ore region is located in the southern part of Sakha Republic (the largest federal subject of the Russian Federation). Elkon gold-uranium fields have the richest deposits of uranium ore, but they have not been developed. Although the natural landscapes of mountain taiga are already changed due to about-century-long geological exploration, we have the last chance to fix the environmental conditions before the start of developing. The paper deals with the characteristics of distribution of radionuclides and element in soils, plants and water of El'kon region and is based on field works performed in 2007–2008 (immediately after the decision on exploration). The Elkon horst is the part of Aldan Shield, an exposed basement of the Siberian craton not covered by the latest sediments. The uranium mineralization is confined to igneous Mesozoic complexes. Weathering and erosion cause dispersion halo of elements and radionuclides which may become probable pollutants. The studied area is divided into four geological formations, but soil probes reveal no distinction in geochemistry specialization. So landscapes were divided into three groups by level, slope exposition and vegetation condition. Each group was measured by couple of samples. The main migration features were assessed by the distribution of elements and radionuclides (some local peaks were found for ⁹⁰Sr, As, Th, and Mo). The As, Pb (rarely Mn, Hg) contamination of soils is proved. The main co-locations were computed for soils. The total contamination was estimated acceptable to moderate rates, therefore, there were found local high-polluted areas in dump zones. The combined database could be used as a reference point for further environmental research.

Keywords: *geochemistry, geoecology, Elkon ore region, uranium mines*

REFERENCES

1. Bespamyatnov, G.P., Krotov, Yu.A. [Maximum permissible concentration values of chemicals in the environment]. Leningrad, Khimiya Publ., 1985, 528 p. (in Russian)
2. Birka, G.I., Tarkhanov, A.V, Men'shikov, Yu.A., Nikol'skii, A.L., et al. [Ore types of El'kon uranium ore field (Sakha-Yakutia, Russia)]. In: [Uranium at the turn of the century: natural resources, production and consuming]. Moscow, VIMS MPR, 2002, pp. 226–236. (in Russian)
3. Vinogradov, A.P. [Average content of elements in the main rock types]. *Geokhimiya*, 1962, no. 7, pp. 555–571. (in Russian)
4. Vorob'ev, K.A., Kurbatov, A.V. [State geological map of Russia, scale 1: 200 000. 2nd edition, Aldan series, sheet O-51-XII (Lower Kuranakh)]. Moscow, MF VSEGEI Publ., 2015, (in Russian)
5. Vorob'ev, K.A., Shumbasova, G.A. [State geological map of Russia, scale 1:200 000. 2nd edition, Aldan series, sheet O-51-XVIII]. Moscow, MF VSEGEI Publ., 2013. (in Russian)
6. [Geochemical data for the State geological map of Russia, scale 1: 1000 000, sheet O–52]. Moscow, IMGRE Publ., 2007. (in Russian)
7. Goleva, R.V. [About ecological support to E'lkon mining and smelting plant project]. *Ratsional'noe osvoenie nedr*, 2011, no. 1, pp. 61–65. (in Russian)
8. Mashkovtsev, G.A., Konstantinov, A.K., Miguta, A.K., et al. [Uranium in the Russia's bowels]. Moscow, VIMS Publ., 2010, 850 p. (In Russian)
9. Miguta, A.K. [Uranium fields of El'kon ore region (Aldan shield)]. *Geologiya rudnykh mestorozhdenii*, vol. 43, no. 2, 2001, pp. 129–151. (in Russian)
10. Morozova, I.A. [Geochemical landscapes and environmental hazard]. In: [Engineering geochemistry, issue 1. Geochemical mapping]. Moscow, IMGRE Publ., 2000, pp. 122–134. (in Russian)
11. Pavlova, I.V., Domarenko, V.A., Galaktionov, V.A., Zhuravlev, V.G. [Forecasting of natural and human-in-

- duced risks in the area affected by the future E'lkon mining metallurgical works (Aldan shield, Republic of Saha-Yakutia)]. *Razvedka i okhrana nedr*, 2019, no. 12, pp. 41–48. (in Russian)
12. Perel'man, A.I., Kasimov, N.S. [Landscape geochemistry]. Moscow, Astrea-2000 Publ., 1999. (in Russian)
 13. Salova, T.A., Nikolaeva, N.A. [Hydrochemical and hydrobiological studies of water in the South Yakutia rivers in the area of E'lkon uranium ore exploration]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*. 2014, no. 5, p. 664. (in Russian)
 14. Samsonov, B.G. [The basics of geological environment monitoring for nuclear raw material exploration, development and operation facilities]. Moscow, Gidrospetsgeologiya Publ., 2010. (in Russian)
 15. Utrobin, D.V., Shevchenko, V.I., et al. [State geological map of Russia, scale 1 : 200 000. 2nd edition, sheet O-52-VII (Tommot)]. Moscow, MF VSEGEI Publ., 2013. (in Russian)
 16. Utrobin, D.V., Vorob'ev, K.A., et al. [State geological map of Russia, scale 1 : 200 000. 2nd edition, sheet O-52-XIII (Yllymakh)]. Moscow, MF VSEGEI Publ., 2015. (in Russian)