

СОДЕРЖАНИЕ

Номер 3, 2021

Неотектоника зоны сочленения мегасвода Большого Кавказа
с Черноморской мегавпадиной

С. А. Несмеянов, О. А. Воейкова

3

ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

Сток влекомых наносов рек Черноморского побережья
Краснодарского Края

В. А. Петров, Н. А. Ярославцев

19

Изотопные, гидрологические и гидрохимические индикаторы
разгрузки грунтовых вод в эстуарии р. Раздольная
(Амурский залив, Японское море) в период ледостава

*П. Ю. Семкин, П. Я. Тищенко, А. Н. Чаркин, Г. Ю. Павлова,
Е. В. Анисимова, Ю. А. Барабанщиков, Т. А. Михайлик,
Е. Ю. Тибенко, П. П. Тищенко, М. Г. Швецова, Е. М. Шкирникова*

29

Поведение грунтов г. Сыктывкар при сейсмических
и микросейсмических нагрузках

В. А. Лютоев, А. Н. Вихоть

44

ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ РАЙОНИРОВАНИЕ

Инженерно-геологическое районирование Арктического шельфа России

А. Е. Рыбалко, М. С. Захаров, В. А. Шербаков, А. С. Локтев

52

ЗАГРЯЗНЕНИЕ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

Мобилизация экологически опасных элементов из хвостов
обогащения лопаритовых руд под действием атмосферных осадков

*Е. А. Красавцева, Д. В. Макаров, Е. А. Селиванова,
В. В. Максимова, А. В. Светлов*

69

Состав речных вод и донных отложений малых рек в условиях
антропогенной нагрузки (на примере р. Кисловка, г. Томск)

*Е. Ю. Пасечник, О. Г. Савичев, В. А. Домаренко, Н. Г. Наливайко,
О. Ю. Гончаров, Н. А. Бровченко, О. Н. Владимирова*

79

МЕТОДОЛОГИЯ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Динамическое экстрагирование элементов из почв техногенных
ландшафтов

Б. В. Дампилова, С. Г. Дорошкевич, О. К. Смирнова, П. С. Федотов

88

Contents

Number 3, 2021

Neotectonics of conjunction zone between the Greater Caucasus megavault and the Black Sea megadepression

S. A. Nesmeyanov, O. A. Voeykova

3

NATURAL AND HUMAN-INDUCED PROCESSES

Runoff of carried river sediments at the Black Sea coast, Krasnodar region

V. A. Petrov, N. A. Yaroslavtsev

19

Isotopic, hydrological and hydrochemical indicators of submarine groundwater discharge in the estuary of Razdolnaya River (Amursky Bay, Sea of Japan) in the ice covered period

P. Yu. Semkin, P. Ya. Tishchenko, A. N. Charkin, G. Yu. Pavlova, E. V. Anisimova, Yu. A. Barabanshchikov, T. A. Mikhailik, E. Yu. Tibenko, P. P. Tishchenko, M. G. Shvetsova, E. M. Shkirknikova

29

Ground behavior in Syktyvkar under seismic and microseismic impact

V. A. Lyutov, A. N. Vikhot'

44

ENGINEERING GEOLOGICAL ZONING

Engineering geological zoning of the Russian Arctic shelf

A. E. Rybalko, M. S. Zakharova, V. A. Shcherbakova, A. V. Loktev

52

ENVIRONMENT CONTAMINATION

Mobilization of environmentally hazardous elements from dressing tailings of loparite ores upon atmospheric precipitation

E. A. Krasavtseva, D. V. Makarov, A. A. Selivanova, V. V. Maksimova, A. V. Svetlov

69

Composition of river water and bottom sediments in minor rivers under anthropogenic load (by the example of Kislovka River, Tomsk)

E. Yu. Pasechnik, O. G. Savichev, V. A. Domarenko, N. G. Nalivaiko, O. Yu. Goncharov, N. A. Brovchenko, O. N. Vladimirova

79

RESEARCH METHODS AND TECHNIQUES

Dynamic extraction of elements from soils in technogenic landscapes

B. V. Dampilova, S. G. Doroshkevich, O. K. Smirnova, P. S. Fedotov

88

УДК 551.434 (234.918)

НЕОТЕКТОНИКА ЗОНЫ СОЧЛЕНЕНИЯ МЕГАСВОДА БОЛЬШОГО КАВКАЗА С ЧЕРНОМОРСКОЙ МЕГАВПАДИНОЙ

© 2021 г. С. А. Несмеянов¹, О. А. Воейкова^{1,*}

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

*E-mail: voa49@mail.ru

Поступила в редакцию 26.01.2021 г.

После доработки 08.02.2021 г.

Принята к публикации 16.02.2021 г.

Среди вариантов сочленения мегасвода Большого Кавказа с Черноморской мегавпадиной рассматривались: зона субдукции, надвиг, крутая флексура и флексурно-разрывная зона. При интерпретации истории развития этих смежных мегаструктур целесообразно опираться на комплекс детальных геолого-геофизических и геоморфологических материалов. Изучение неотектоники на основе оротектонического метода выявило различие раннеорогенной и позднеорогенной юго-западных границ мегасвода. Раннеорогенным бортом мегасвода Большого Кавказа служит его граница с Туапсинским краевым прогибом, выполненным олигоцен-миоценовыми отложениями майкопской серии. На позднеорогенной стадии установлено погружение значительной части западной периферии мегасвода и “втягивание” в воздымание Адлерской впадины, являвшейся на раннеорогенной стадии восточной частью Туапсинского прогиба. Предложено неоструктурное районирование современного шельфа, который отличается меньшей дифференцированностью блоковых структур, чем прибрежные части мегасвода. Юго-западной границей современного шельфа и Туапсинского прогиба служит фрагмент Южной Крымско-Кавказской флексурно-разрывной шовной зоны. Позднеорогенное погружение части мегасвода свидетельствует о тафрогенном воздействии расширяющейся Черноморской мегавпадины на ороген Большого Кавказа. В четвертичном периоде это воздействие проявилось в активизации наложенных, преимущественно поперечных грабенов.

Ключевые слова: мегасвод, мегавпадина, ороген, шельф, прогиб, грабен, надвиг, флексурно-разрывная зона, неотектонический этап, раннеорогенная и позднеорогенная стадии, оротектонический метод

DOI: 10.31857/S086978092103005X

ВВЕДЕНИЕ

Динамичное хозяйственное освоение береговой и шельфовой зон Черноморского побережья России, где уже сооружены различные трубопроводы и строятся портовые сооружения, актуализирует необходимость неотектонических исследований, связанных с определением условий формирования, оценкой и прогнозом развития структур, для обеспечения геоэкологической безопасности территорий размещения ответственных и др. инженерных объектов и проживающего там населения.

Общеизвестно, что западно-кавказский шельф наложен как на элементы Туапсинского краевого прогиба, выполненного преимущественно раннеорогенными молассами майкопской серии, так и на доорогенные образования периферической части Большого Кавказа, оказавшиеся в пределах современного Черного моря. Следовательно, граница новейшего орогена и Черноморской мегавпадины не оставалась постоянной, а смещалась.

Динамика соотношения этих макрорегиональных структур объясняется с различных позиций.

Традиционная позиция, которую можно считать исходной, предполагает расширение здесь морской впадины за счет глубинных процессов преобразования земной коры и верхней мантии (В. В. Белоусов, Е. Е. Милановский и др.).

Столь же традиционная мобилистская концепция рассматривает смещение границ Кавказских орогенов и Черноморской мегавпадины в результате взаимодействия перемещающихся по латерали Африкано-Аравийской и Евразийской систем литосферных плит (В. Е. Хаин, Е. В. Артюшков, С. А. Ушаков, Л. П. Зоненшайн и др.). В последнее время процесс перемещения литосферных плит и микроплит предлагается и здесь ослобнить движением террейнов (А. М. Никишин и др.). Но все эти подходы характеризовали данное взаимодействие указанных мегасвода и мегавпадины только в самом общем виде.

Цель представленного исследования – охарактеризовать новейшую перестройку южного борта мегасвода западной части Большого Кавказа и оценить структурное положение современного достаточно узкого черноморского шельфа. Для достижения данной цели гораздо эффективнее использовать существующий комплекс детальных геолого-геофизических и геоморфологических материалов.

1. СОЧЛЕНЕНИЕ МЕГАСВОДА БОЛЬШОГО КАВКАЗА С ТУАПСИНСКИМ ПРОГИБОМ И ПОЛОЖЕНИЕ СОВРЕМЕННОГО ШЕЛЬФА

О характере сочленения Туапсинского прогиба с мегасводом Большого Кавказа можно судить преимущественно по косвенным данным. Дело в том, что “северное узкое и крутое крыло прогиба на временных разрезах МОГТ¹ записано быть не может” [21].

На смыкающем крыле трассируемой здесь части Южной Крымско-Кавказской флексуно-разрывной зоны [13] между Утришем и Геленджиком коренные выходы эоцена установлены драгированием на глубинах от 250 до 1 000 м [24]. Размах крыла по кровле эоцена составляет 5–9 км, а средняя его крутизна – 40°. По аналогии с Сочинским районом допускается существование здесь надвиговых структур [21]. В прилегающей к этому крылу зоне наблюдается увеличение мощностей палеоцен-эоценовых отложений до 2 км, в то время как на южном крыле Туапсинского прогиба их мощность не превышает первых сотен метров (там же, с. 99).

Следовательно, раннеорогенный прогиб своей северо-восточной прибортовой частью наследует более узкий и маломощный флишевый прогиб. Поскольку на южном крыле Туапсинского прогиба мощность меловых отложений всего 1–1.5 км, то ее нарастание к Новороссийскому синклинию, вероятно, совпадает с северным бортом более позднего Туапсинского прогиба (там же). Соответственно, этот борт представляет собой структурный шов, по которому в позднегеосинклинальную или раннеорогенную эпоху произошла инверсия знака вертикальных движений. В мезозое активные прогибания располагались к северу от этого шва, а в кайнозое – к югу от него.

Строение данного сочленения может в деталях интерпретироваться по-разному, но в целом, поскольку у бровки шельфа эоценовые породы обнаружены драгированием в коренном залегании, а в 10–15 км мористее кровля эоцена зафиксирована сейсмопрофилями на глубинах 9–10 км, то эта структура рассматривается как “огромный флексунообразный перегиб” [10]. Несмотря на

то, что строение перегиба в сейсмозаписи не читается, предполагается, что этот перегиб “нарушен крупноамплитудными надвигами”. Последнее предположение основывается на следующих фактах:

1) северный борт Адлерской впадины, являющийся явным юго-восточным продолжением Туапсинского прогиба, нарушен Пластунским надвигом, по которому породы палеоцена, эоцена и верхнего мела перекрывают мощные аналоги майкопской серии;

2) в северо-западном замыкании Туапсинского прогиба морской сейсморазведкой зафиксирован крутой надвиг с амплитудой смещения по кровле эоцена 1.5–2 км, по которому Анапский выступ сочленяется с прогибом [10].

Поэтому северо-восточным ограничением Туапсинского раннеорогенного прогиба часто считается надвиг, служащий морским продолжением Пластунского или Воронцовского надвигов [9]. Между ним и современным берегом располагается шельф. В некоторых профилейных реконструкциях в пределах данного флексуно-сочленения рисуется структурная ступень, ограниченная надвигами, обоснования которой не приводится [23].

Более рациональным является представление о существовании позднеорогенной Южной Крымско-Кавказской флексуно-разрывной шовной зоны на сочленении орогена Большого Кавказа и Черноморской мегавпадины [11, 13]. Но более детальная расшифровка строения этой структуры нуждается в дополнительных материалах.

Для уточнения строения всего комплекса разновозрастных новейших структур в зоне сочленения мегасвода и мегавпадины на основе оротектонического метода [14] анализировались строение рельефа, геологии, неструктурного районирования, данные по возрастному расчленению рельефа, деформациям морских террас [13, 15, 17, 23]. Представление о строении изученной части шельфа и континентального склона опиралось на опубликованные сейсмопрофили МОГТ [10, 21], которые, как было отмечено выше, не достигают прибрежных частей шельфа (рис. 1). Эти данные позволили анализировать деформации разновозрастных морских стратиграфических и наземных геоморфологических уровней, сопоставляя разновысотные геофизические и геоморфологические профили.

Было выбрано 3 профиля (с северо-запада на юго-восток), ориентированных по морю на юго-восток от: 1) восточной части Цемесской бухты; 2) траверза р. Пшад и 3) траверза пос. Лазаревский. Соответственно профили именуются: Новороссийский, Пшадский и Лазаревским, и опираются на исходные профили, включающие следующие элементы [10, 17, 21, 23]:

¹ Метод общей глубинной точки.

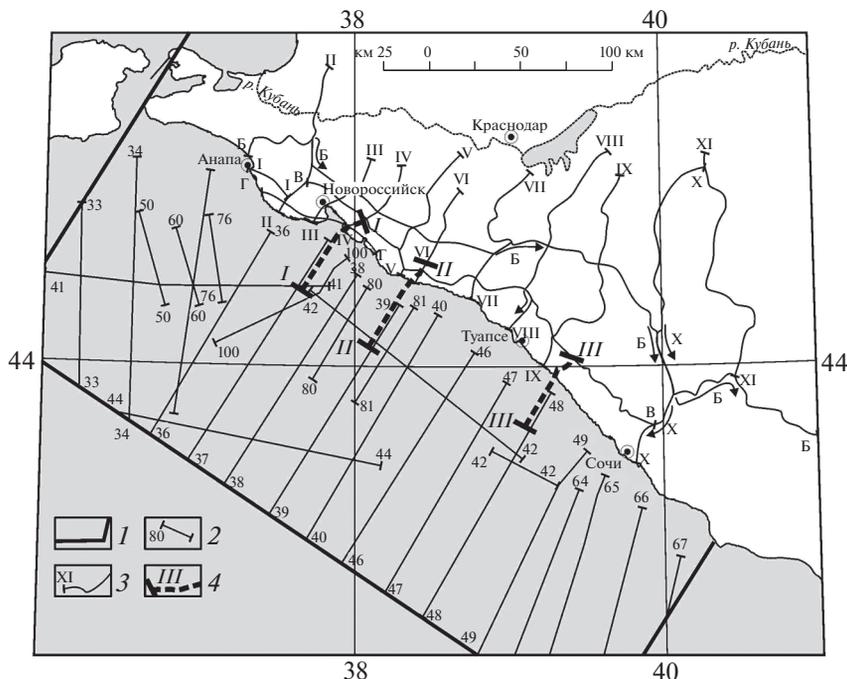


Рис. 1. Карта фактического материала для построения комплексных геолого-геоморфологических профилей: 1 – граница площади геофизических работ; 2–4 – линии профилей: 2 – геофизических [21], 3 – геолого-геоморфологических [13], 4 – комплексных (см. рис. 2–4).

1) Новороссийский профиль: II геологический, 37 МОГТ, IV геолого-геоморфологический профили (рис. 2);

2) Пшадский профиль: III геологический, 39 МОГТ, VI геолого-геоморфологический профили (рис. 3);

3) Лазаревский профиль: IV геологический, 48 МОГТ и IX геолого-геоморфологический профили (рис. 4).

Для расшифровки строения рассматриваемой территории выбрано два следующих коррелятных уровня, каждый из которых включает сходные по возрасту стратиграфические (в морской части) и геоморфологические (на суше) составляющие, деформации которых отражают соответственно строение ранне- и позднеорогенных структур и движений:

а) для изучения морфологии раннеорогенных структур:

– в морской части наиболее представителен опорный отражающий сейсмический горизонт Па, отвечающий кровле эоценовых отложений; повсеместная маломощность отложений, накопившихся в первой половине олигоцена, позволяет достаточно надежно определить положение в разрезе подошвы майкопской серии, т.е. подошвы новейших отложений [21];

– в наземной части достаточно уверенно картируется раннеорогенный ($P_3-N_1^1$, т.е. майкопский) геоморфологический уровень;

б) для изучения морфологии позднеорогенных структур и суммарных позднеорогенных вертикальных тектонических движений:

– в морской части использовались опорные отражающие горизонты: Ia – кровля майкопской серии, хорошо фиксирующаяся на всех современных разрезах сейсмопрофилей МОГТ [10], и стратиграфически близкий к нему горизонт I – кровля среднего миоцена;

– в наземной части наиболее представителен “сарматский” (N_1^3), а точнее позднесарматский геоморфологический уровень.

Следует отметить, что четвертичные отложения деформированы существенно иначе, чем более древние. Поэтому в пределах позднеорогенной стадии могут выделяться две подстадии, отражающие существенную структурную перестройку в пределах Туапсинского прогиба.

Общим для морской части всех профилей были следующие обстоятельства [10]:

– существенное различие в деформированности подошвы и кровли майкопских отложений в северной части Туапсинского прогиба, свидетельствующее о глинистом диапиризме в майкопских отложениях и большей вторичной деформи-

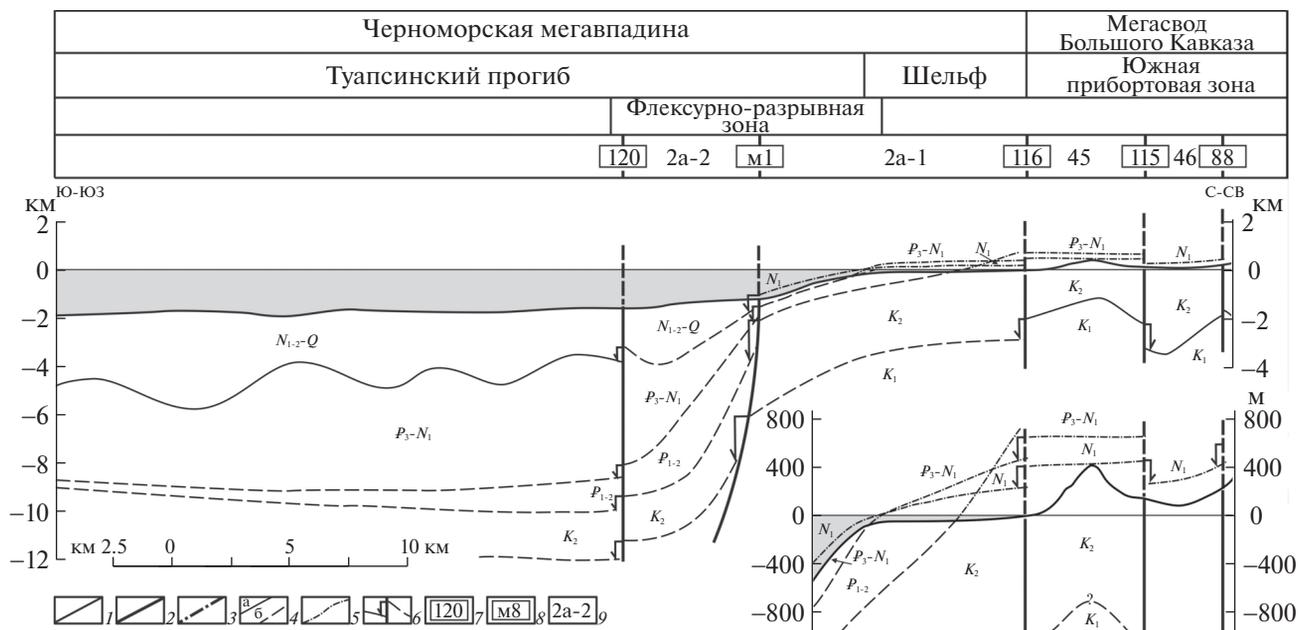


Рис. 2. Новороссийский геолого-геоморфологический профиль I: 1–3 – разрывные нарушения: 1 – доорогенные, 2–3 – позднеорогенные (2 – сквозные, 3 – внутриформационные); 4 – геологические границы (а – достоверные, б – предполагаемые); 5 – геоморфологические уровни; 6 – амплитуда разрывного смещения; 7–9 – индексы позднеорогенных структур: 7–8 – разрывных (см. табл. 1): 7 – переходящих с суши на шельф, 8 – морских; 9 – блоковых структур (см. табл. 2).

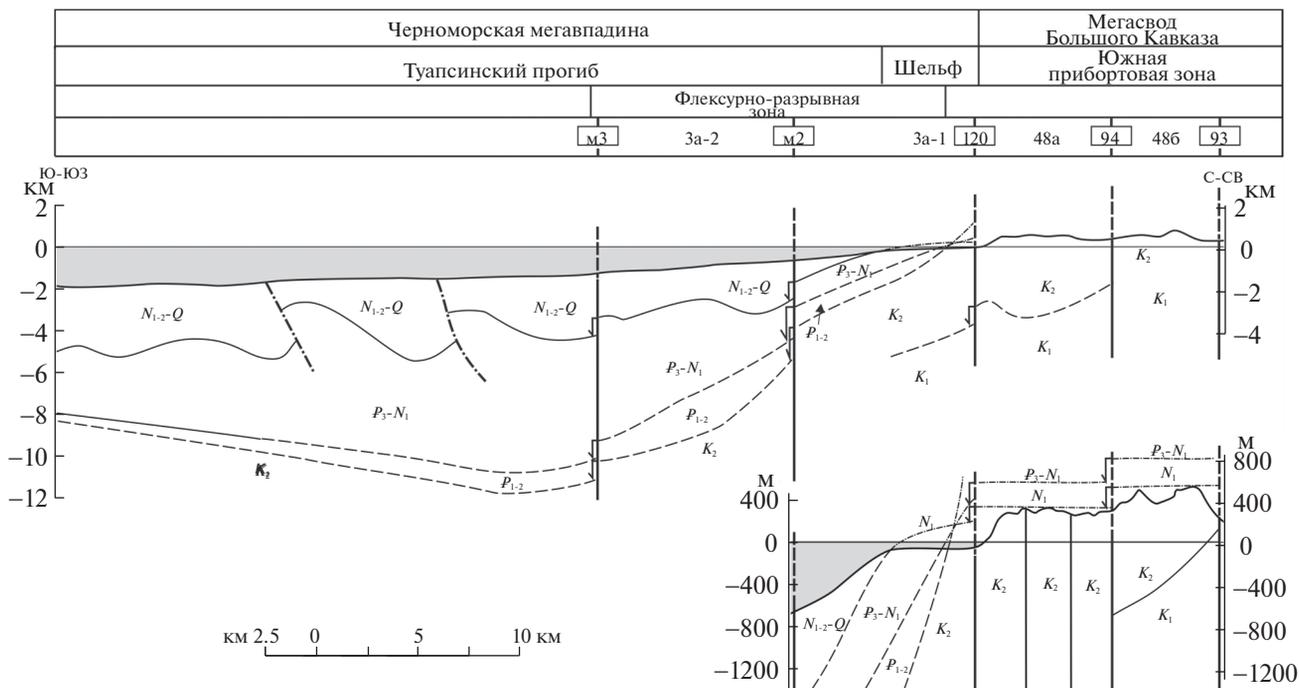


Рис. 3. Пшадский геолого-геоморфологический профиль II. (Условные обозначения см. рис. 2).

рованности позднеорогенных отложений по сравнению с низами раннеорогенных отложений и слабо деформированной подошве майкопской серии;

– существование разрывов, нарушающих позднеорогенные отложения и не проникающих в низы раннеорогенных отложений; часть из них не доходила до земной поверхности дна моря;

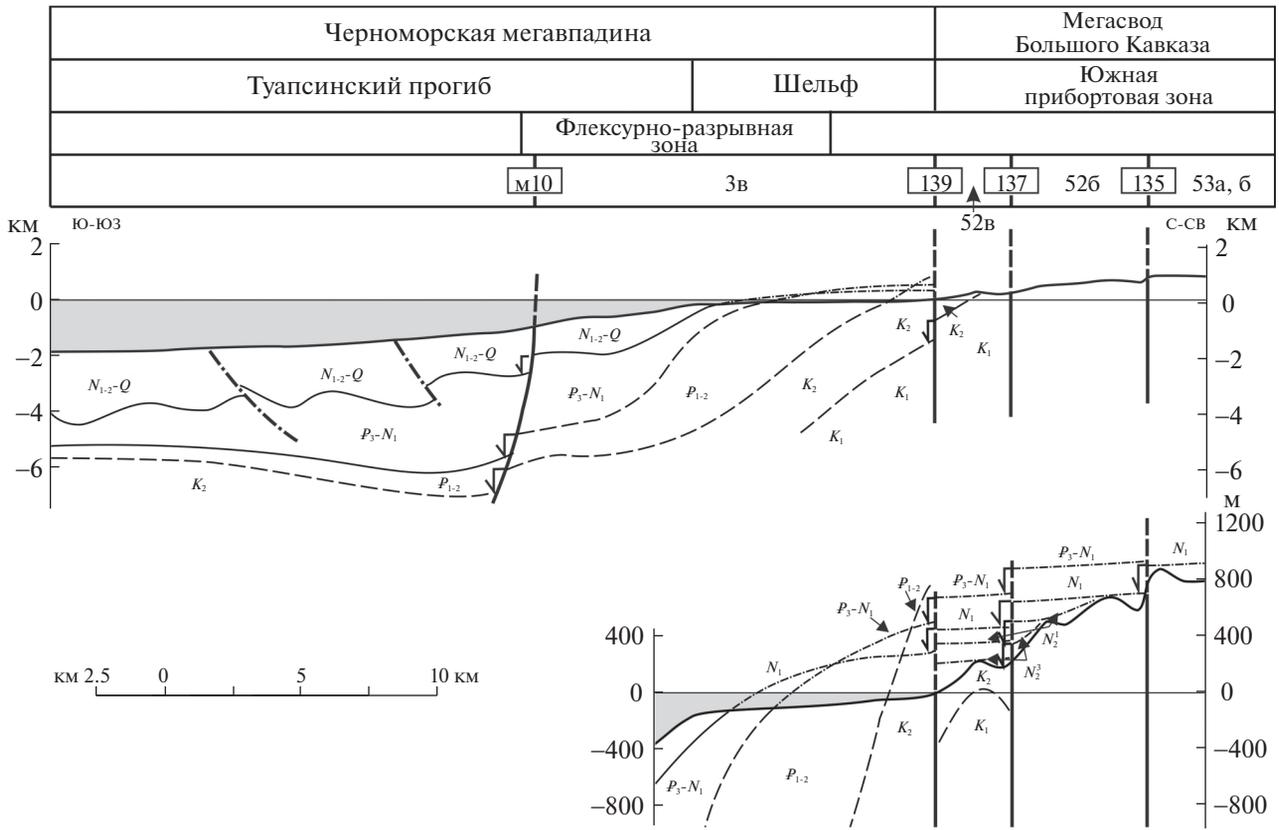


Рис. 4. Лазаревский геолого-геоморфологический профиль III. (Условные обозначения см. рис. 2).

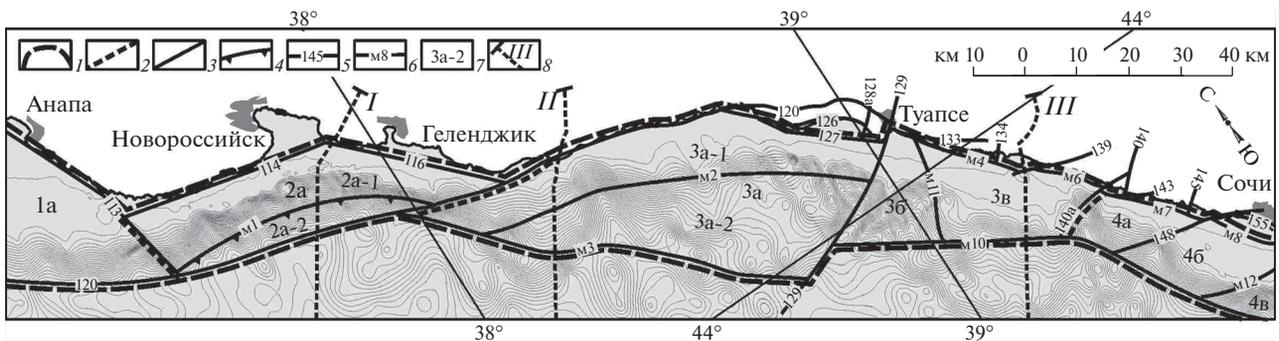


Рис. 5. Схема районирования позднеорогенных структур зоны сочленения западной части мегасвода Большого Кавказа с Черноморской впадиной: 1–2 – границы: 1 – зоны, 2 – сегментов; 3–4 – разрывные нарушения: 3 – сбросы, 4 – циркуобразные сбросы; 5–6 – индексы разрывных структур (см. табл. 2): 5 – переходящих с суши на шельф, 6 – морских; 7 – индексы блоковых структур (см. табл. 1); 8 – линии комплексных профилей и их номера (см. рис. 2–4).

– кроме того, отмечались небольшие разрывы, деформирующие подошву новейших отложений, но не проникающие в позднеорогенные отложения.

В то же время, в пределах рассматриваемой территории, безусловно, присутствуют сквозные разрывы, рассекающие все новейшие и более древние отложения и выраженные в рельефе.

В результате выявилось блоковое строение позднеорогенного шельфа и материкового склона (рис. 5, табл. 1 и 2), и можно сделать следующие общие выводы:

- прикавказский шельф и материковый склон имеют в целом крупноблоковое строение;
- новейшие позднеорогенные структуры шельфа и материкового склона принципиально отличаются от подобных структур мегасвода Большого Кавказа.

Таблица 1. Блоковые структуры зоны сочленения западной части мегасвода Большого Кавказа и Черноморской мегавпадины

Индекс структуры	Название	Тип
1	Анапский сегмент	
1а	Анапский	выступ
2	Геленджикский сегмент	
2а	Новороссийская	группа блоков
2а–1	Абрауско-Геленджикский	прибрежный поднятый блок
2а–2	Южноабрауский	присклоновый опущенный блок
3	Туапсинский сегмент	
3а	Джубгинская	группа блоков
3а–1	Джубгинский	прибрежный блок
3а–2	Южноджубгинский	опущенный блок
3б	Туапсинский	блок
3в	Южнолазаревский	блок
4	Сочинский сегмент	
4а	Южноварданинский	блок
4б	Южносочинский	блок
4в	Южноадлерский	блок

шого Кавказа, во-первых, меньшей дифференцированностью, во-вторых, отсутствием крупных грабенообразных структур;

– наиболее характерной чертой строения современного шельфа является последовательная ступенчатость блоков, разделенных малоамплитудными разрывами (линеаментами);

– неотектоническое позднеорогенное строение шельфа и материкового склона коренным образом отличается от расположенной мористее глубоководной части (глубина порядка 1.7–2 км), рельеф которой осложнен диапировыми поднятиями. В нем почти не выражен вал Шатского, четко фиксирующийся в деформациях подошвы новейших (майкопской серии) отложений. Этот вал, по геофизическим данным, частично проявляется в распределении мощностей плиоценовых отложений и не прослеживается в распределении мощностей четвертичных отложений и в деформациях их подошвы (отражающий горизонт В) [21].

Выявились сложные соотношения ранне- и позднеорогенных структур. На раннеорогенном подэтапе граница Туапсинского прогиба и мегасвода Большого Кавказа была, по-видимому, очень резкой. Ряд исследователей, как отмечалось выше, проводят здесь надвиг на продолжении Пластунского надвига в Воронцовской зоне [10, 21]. Флексурно-разрывная позднеорогенная зона проходит косо по отношению к этой раннеорогенной границе (рис. 6). Соответственно разные части флексурно-разрывной зоны располагаются на раннеорогенных фрагментах как южной периферии мегасвода Большого Кавказа, так и северной зоны Туапсинского краевого прогиба.

В пределах *Новороссийского профиля* (см. рис. 2) в море расположен значительный фрагмент раннеорогенного края мегасвода Большого Кавказа, соответствующий Абрауско-Геленджикскому прибрежному блоку (2а-1). В его южной части фиксируется присбросовый уклон верхней части флексурно-разрывной зоны. Основная флексурная деформация флексурно-разрывной шовной зоны и северный борт Туапсинского раннеоро-



Рис. 6. Структурное положение флексурно-разрывных зон на схеме соотношения ранне- и позднеорогенных структур Туапсинского прогиба: 1–4 – структурные элементы Туапсинского прогиба: 1 – граница прогиба, 2 – ось прогиба, 3 – изолинии кровли эоцена (км), 4 – оси диапировых складок (3–4 по [10]); 5 – Пластунский раннеорогенный надвиг [9]; 6–8 – позднеорогенные структуры: 6 – активные разрывы, 7–8 – флексурно-разрывные зоны (7 – Южная Крымско-Кавказская, 8 – Западно-Кавказская).

Таблица 2. Разрывные структуры зоны сочленения западной части мегасвода Большого Кавказа и Черноморской мегавпадины

Индекс структуры	Название	Тип
113	Западноутришский	сброс
114	Южноабрауский	сброс
116	Джанхотский	сброс
120	Джубгинский	сброс
126	Кадошский	сброс
128a	Агойский (Восточнокуйбышевский)	поперечный сброс
129	Туапсинский	поперечный сбросо-сдвиг
133	Кипарисовый	сброс
134	Ашейский	поперечный сброс
139	Солониковский	сброс
140a	Головинский	поперечный сброс
140	Шахинский	поперечный сброс
143	Нижнебууский	сброс
145	Учдеринский	поперечный сброс
148	Южномамайский	поперечный сброс
155	Южноахунский	сброс
158	Приморскосочинский	сброс
m1	Южноабрауский нижнесклоновый	циркообразный сброс
m2	Архипо-Осиповский среднесклоновый	сброс
m3	Южноджубгинский нижнесклоновый	сброс
m4	Макопсинский верхнесклоновый	сброс
m5	Ашейский верхнешельфовый	циркообразный сброс
m6	Лазаревский верхнешельфовый	сброс
m7	Южношахейский верхнесклоновый	сброс
m8	Приморскосочинский верхнесклоновый	сброс
m9	Адлерский верхнешельфовый	сброс
m10	Южнолазаревский нижнесклоновый	сброс
m11	Южнотуапсинский среднесклоновый	поперечный сброс
m12	Южноадлерский среднесклоновый	поперечный сброс

генного краевого прогиба локализируются в пределах узкого Южноабрауского присклонового блока (2а–2). Этот блок ограничен сбросами, южный из которых является продолжением Джубгинского сброса (120) на суше. Величина флексурной части перегиба достигает по подошве новейших моласс (майкопской серии P_3-N_1) 7 км. Собственно разрывные смещения по обоим упомянутым разрывам, по-видимому, не превышают 1 км. Судя по характеру смещений кровли и подошвы раннеорогенных моласс, Джубгинский сброс активизировался преимущественно на позднеорогенной стадии.

Северный Абрауско-Геленджикский блок (2а–1) слабо деформирован. В его южной части флексурный перегиб только намечается. А на большей части этого блока к земной поверхности

приближены доорогенные (доновейшие) литифицированные отложения, в том числе верхнемеловые. Этот блок ограничен с севера Джанхотским (116) сбросом, отделяющим шельфовые структуры от подходящих с севера и косо к ним ориентированных позднеорогенных структур Абрауского брахисвода [13].

В пределах *Пишадского профиля* (см. рис. 3) строение флексурно-разрывной зоны существенно меняется. Здесь в ее пределах выделяется два крупных продольных блока: 1) Джубгинский прибрежный (3а–1) и 2) Южноджубгинский (3а–2). В каждом из них фиксируется значительная и соразмерная флексурная деформация (с вертикальной амплитудой соответственно 3 км в блоке 3а–1 и 5 км в блоке 3а–2). Смещение по разрывам в целом на порядок меньше, но наибольшая амплиту-

да (порядка 1 км) относится к разделяющему упомянутые блоки Архипо-Осиповскому верхне-склоновому сбросу (м2). Смещение по краевым Джубгинскому сбросу (120) и Южнодзубгинскому нижне-склоновому сбросу (м3) составляет сотни метров.

Здесь раннеорогенный край мегасвода незначителен, и флексурно-разрывная зона и северный край Туапсинского прогиба сближены с современным берегом моря. Современный шельф сужен и занимает северный край Джубгинского прибрежного блока (3а–1).

Учитывая сказанное, можно считать, что в данном сечении северный край раннеорогенного Туапсинского прогиба трассируется в южной части Джубгинского блока (3а–1), но основной перегиб приходится на зону осевого Архипо-Осиповского среднесклонового сброса (м2) и Южнодзубгинский блок (3а–2). Прибрежный Джубгинский блок (3а–1) представлял на раннеорогенной стадии геологического развития слабо опущенное южное крыло мегасвода Большого Кавказа.

На *Лазаревском профиле* (см. рис. 4) собственно флексурный перегиб с амплитудой до 5 км новейшей флексурно-разрывной зоны и северный край Туапсинского прогиба локализируются в южной части одного крупного структурного блока — Южнолазаревского (3в), который с севера и юга ограничен сбросами: Лазаревским верхнешельфовым (м3) и Солониювским (139) с амплитудами соответственно в первые сотни и десятки метров. В северной части этого блока располагались: 1) раннеорогенная часть мегасвода Большого Кавказа, и 2) современный шельф, где абразией срезана значительная часть палеогеновых отложений.

Суммируя сказанное, можно заключить, что строение Южной Крымско-Кавказской флексурно-разрывной зоны существенно различно на трех приведенных профилях. Однако на всех этих профилях в пределах указанной зоны располагались северный борт раннеорогенного Туапсинского прогиба и южный край одновозрастного орогена Большого Кавказа. Во всех сечениях амплитуда флексурного перегиба существенно больше амплитуды разрывных смещений. Флексурное смещение развивалось в течение всего новейшего этапа геологического развития, а разрывные смещения — преимущественно на позднеорогенной его стадии. Современная флексурно-разрывная зона восточнее сечет как локальные структуры юга Адлерской впадины, так и подпадающие с запада диапировые позднеорогенные складки [10, 21]. Флексурно-разрывная зона в пределах Адлерской впадины претерпела весьма существенную перестройку. Ее северный край сместился на позднеорогенной стадии от Ворон-

цовской шовной зоны на юг в прибрежную Имеретинскую низменность.

2. ИСТОРИЯ СТРУКТУРНЫХ ПЕРЕСТРОЕК И ФОРМИРОВАНИЕ ЮЖНОЙ КРЫМСКО-КАВКАЗСКОЙ ФЛЕКСУРНО-РАЗРЫВНОЙ ЗОНЫ

Прикавказская часть Южной Крымско-Кавказской флексурно-разрывной зоны сформировалась в полосе неоднократных структурных перестроек. Можно выделить несколько крупных этапов с различным ее строением и существенными структурными перестройками на их границах.

Доорогенный этап

Доорогенный этап делится на два подэтапа: позднемезозойский и палеоцен-эоценовый.

Позднемезозойский подэтап. К северу от рассматриваемой зоны и, по-видимому, захватывая значительную ее западную часть в конце юрского и мелового периода располагался Новороссийско-Лазаревский синклиниорий, к югу от которого простиралась Адлерско-Абхазская относительно приподнятая зона, часто трактуемая в качестве зоны срединных массивов геосинклинали [1, 3, 4]. Границей между этими крупными поясами восточнее в районе городов Сочи и Адлер служила узкая антиклинальная зона Ахцу-Кацирха. Она сложена мальмскими рифогенными известняками, свидетельствующими, что еще с конца юрского периода эта краевая (промежуточная) антиклинальная зона располагалась на границе геосинклинали южного склона Большого Кавказа и Закавказского срединного массива. В конце раннего мела произошло оживление тектонических движений, обусловившее инверсионную перестройку в приосевой зоне Новороссийского прогиба, приведшую к образованию Семигорского относительного поднятия, Тхабской и Анапско-Агойской подзон прогибания. Последняя оставалась относительно опущенной по сравнению с более южной Адлерско-Абхазской зоной.

Палеоцен-эоценовый подэтап. В палеоцен-эоцене вдоль современного шельфа Западного Кавказа сформировался узкий (шириной около 20–30 км) флишевый прогиб (Тунская синклинали) глубиной до 1.5–2 км [21]. На участке континентального склона от Утриша до Геленджика драгированием на глубинах от 250 до 1 000 м установлены коренные выходы эоцена [24]. Наибольшую ширину этот прогиб имел, по-видимому, в районе Анапского выступа. На южном крыле Туапсинского прогиба мощность палеоцен-эоценовых отложений не превышает первых сотен метров [21].

Орогенный этап

По современным представлениям [2], начало роста орогена Большого Кавказа относится к позднему эоцену, а на рубеже эоцена и олигоцена началось быстрое флексурное погружение Туапсинского прогиба. Орогенный этап делится на два подэтапа (или стадии).

Раннеорогенный подэтап характеризуется формированием Туапсинского прогиба шириной до 50 км и глубиной до 5 км. Ось его была приближена к северному борту. Последний на востоке определялся развитием Воронцовской системы крупных надвигов (фронтальным обычно считается Пластунский надвиг). На северо-западном замыкании Туапсинского прогиба морской сейсмозаземкой также зафиксирован крутой надвиг с амплитудой по кровле эоцена до 1.5–2 км. На этом основании подобный раннеорогенный надвиг предполагается вдоль всего северного борта Туапсинского прогиба [10]. Соответственно мегасвод Большого Кавказа, ограниченный с юга этим надвигом, был существенно шире современного.

Позднеорогенный подэтап. С позднеорогенным подэтапом связана активизация формирования Южной Крымско-Кавказской флексурно-разрывной зоны. Последняя, очевидно, наложилась на ряд более древних шовных структур: 1) западное продолжение мезозойской антиклинальной гряды Ахцу-Кацирха, 2) палеоцен-эоценовый прогиб Тунской синклинали, 3) надвиговой северный борт раннеорогенного Туапсинского прогиба [1, 13, 18, 21]. Считается, что основная фаза надвигообразования в Туапсинском и Сорокинском краевых прогибах произошла в среднем сармате. При этом в Туапсинском прогибе надвиговые структуры характеризовались пологим detachmentом по глинистым отложениям нижнего майкопа, не нарушенным разрывами [2].

Таким образом, позднеорогенная флексурно-разрывная зона, так или иначе, наследует местоположение целого ряда разнотипных и разновозрастных пограничных (шовных) структур. Очевидно, она является современным структурным выражением зон сложных пограничных структурных перестроек. При этом неоднократно менялся знак относительных вертикальных движений по краям и в пределах флексурно-разрывной зоны. В конце мезозоя повышенные прогибания располагались к северу от нее, в палеоцене и эоцене — на месте этой зоны, в новейшее время — к югу от нее.

На позднеорогенном подэтапе здесь граничат структуры новейшей раннеорогенной части мегасвода Большого Кавказа и Черноморской депрессии. При этом между современным орогеном и флексурно-разрывной зоной расположен слабо дислоцированный шельф. Граница шельфа и

флексурно-разрывной зоны проходит внутри широких блоковых структур и проводится довольно условно по началу увеличения уклона структурных поверхностей (см. рис. 6).

Различия в строении прибрежных структур и Южной Крымско-Кавказской флексурно-разрывной зоны и их соотношения со смежными структурами позволяют выделить здесь четыре сегмента.

Анапский сегмент соответствует Анапскому выступу (1а), имеющему треугольную форму и представляющему собой опущенный западный полусвод смежного Абрауского брахисвода (44). Эти структуры разделены Западноутришским сбросом (113), разрывная зона которого осложнена системой сеймотектонических и сейсмогравитационных дислокаций [18]. Позднеорогенная флексурно-разрывная зона наложена здесь на южный край Анапского выступа.

Геленджикский сегмент (см. рис. 2) относительно узок и расположен почти целиком на фрагменте раннеорогенного края мегасвода Большого Кавказа (блок 2а–1). Основная флексурная деформация и северный борт Туапсинского раннеорогенного краевого прогиба локализируются в пределах узкого южного края флексурно-разрывной зоны (блок 2а–2). Граница Геленджикского и Туапсинского сегментов располагается на продолжении Джубгинского сброса (120).

Туапсинский сегмент (см. рис. 3, 4) значительно расширяется в средней своей части, располагаясь в равной мере на северном борту Туапсинского прогиба и южного края мегасвода Большого Кавказа. Основная амплитуда флексурного перегиба относится к смежным частям указанных структур. Граница Туапсинского и Адлерского сегментов, по-видимому, отвечает продолжению Шахинского сброса (140).

Адлерский сегмент располагается практически целиком в пределах раннеорогенного Туапсинского прогиба, ориентируясь диагонально к оси последнего. Здесь позднеорогенная флексурно-разрывная зона отделяет наиболее прогнутую восточную часть данного прогиба от его северо-восточной периклинальной части — Адлерской впадины [13]. При этом позднеорогенные диапировые складки пересекают южный край флексурно-разрывной зоны [10, 21].

Адлерская впадина на раннеорогенной стадии представляла собой северо-восточную краевую часть Туапсинского краевого прогиба, расположенную перед фронтом Центрального сегмента мегасвода и практически замещающую собой Южную прибортовую зону в Западном сегменте мегасвода. А на позднеорогенной стадии эта часть краевого прогиба оказалась “втянутой” в воздымания и стала элементом Южной прибортовой зоны мегасвода (рис. 7).



Рис. 7. Соотношение основных структур западной части мегасвода Большого Кавказа с краевыми прогибами: 1–3 – мегасвод Большого Кавказа: 1–2 – Западный сегмент: 1 – зона осевой цепи брахисводов, 2 – Северная и Южная прибортовые зоны; 3 – Центральный сегмент; 4–6 – границы мегасвода: 4 – северная стабильная, 5–6 – южные: 5 – раннеорогенная, 6 – позднеорогенная; 7–8 – границы элементов мегасвода: 7 – сегментов, 8 – зон; 9–11 – флексурно-разрывные зоны: 9 – Северная Крымско-Кавказская, 10 – Западно-Кавказская, 11 – Южная Крымско-Кавказская; 12 – раннеорогенный краевой надвиг; 13 – пликативная граница Туапсинского прогиба (12, 13 по [9]).

В результате становится очевидной существенная перестройка южного борта Западного сегмента мегасвода Большого Кавказа. На раннеорогенной стадии край мегасвода совпадал с северо-восточным бортом Туапсинского прогиба и включал на западе ныне погруженный Анапский выступ. На востоке Западного сегмента мегасвода северо-восточное окончание Туапсинского прогиба (современная Адлерская впадина) замещало Южную прибортовую зону мегасвода. На позднеорогенной стадии Анапский выступ и значительная часть прежде широкой Южной прибортовой зоны опустилась и была занята шельфом, по северо-восточной границе которого ныне проходит край мегасвода. Но восточнее в его пределы оказалась «втянута» воздыманиями часть Туапсинского прогиба, ставшая Адлерской впадиной.

Следовательно, на большей части Западного сегмента мегасвода Большого Кавказа произошло определенное наступание Черноморской депрессии на край мегасвода в конце новейшего этапа геологического развития. Это наступание сопровождалось опусканием вала Шатского и перекосом Туапсинского прогиба. Параллельно происходило становление Таманского полуострова и отмирание Керченко-Таманского прогиба, поперечного к простиранию Крымско-Кавказской цепи орогенов [13].

3. СТРОЕНИЕ РОССИЙСКОЙ ЧАСТИ ЧЕРНОМОРСКОГО ШЕЛЬФА

Из всего изложенного выше ясно, что доновейшие и новейшие структуры кардинально различаются не только по расположению, но и по своему стилю. Если новейшие структуры имеют преимущественно блоковый характер, то более древние, обычно фиксируемые при геологической съемке, характеризуются развитием складчатых форм, сопровождаемых соскладчатыми разрывами, преимущественно надвигового и взбросо-надвигового характера. Поэтому новейшие (особенно позднеорогенные) структуры являются в районах развития палеогеновых и более древних пород в основном дискордантно наложенными.

Сам шельф неоднороден. Его западная часть в основном сформирована по мел-палеогеновому флишу, и лишь фронтальный край и верхи материкового склона сложены породами неогеновой и четвертичной систем, т.е. относятся к Туапсинскому прогибу. Восточная часть шельфа (район Большого Сочи) образовалась целиком на новейших, преимущественно раннеорогенных (олигоцен-миоценовых) молассах, формирующих восточную часть Туапсинского прогиба [13].

3.1. Неотектоника западной части приорогенного шельфа

Неотектоника западной части приорогенного шельфа понимается неоднозначно. Выше на примере трех синтетических (геолого-геофизических и геоморфологических) профилей была установлена крупноблоковость позднеорогенных структур и их несовпадение со структурами раннеорогенными. При этом среди относительно редких активных разрывов явно преобладают продольные.

Следует отметить существование для отдельных частей зоны сочленения Большекавказского орогена и Черноморской мегавпадины тектонических схем с чрезвычайно большой плотностью продольных и поперечных разрывов, часто пересекающихся без взаимного смещения. Такие схемы мало информативны, а часто и бездоказательны, поскольку, как правило, опираются на применение линеamentного анализа без учета возрастного расчленения рельефа и деформаций соответствующих геоморфологических уровней. Так, на схеме, составленной под руководством Л.И. Лобковского [6, 7], на суше и на шельфе явно преобладают разрывы поперечного к кавказскому побережью (северо-восточного) простирания. При этом не указываются ни тип разрывных нарушений, ни направление разрывных смещений, не анализируется должным образом и вопрос о возрасте рассматриваемых разрывных нарушений.

На этой и подобных схемах не учитывается и доказанное для Западного Кавказа существование весьма значительной структурной перестройки не только в начале, но и в пределах новейшего этапа геологического развития. Поэтому такие схемы требуют тщательной проверки и согласования со схемой неоструктурного районирования, составленной для наземной части мегасвода с применением оротектонического метода [13] и учитывающей тектонические деформации плейстоценовых морских террас [17].

На территории западной части шельфа и материкового склона проведены сейсмическое профилирование и сейсмоакустическая съемка. Они позволили в верхней части геологического разреза отделить слабо консолидированные осадочные отложения мощностью до 6–14 м от “коренных сильнодислоцированных пород” акустического фундамента, в котором фиксируются складки [22, с. 360–361]. По наличию несогласий выше акустического фундамента (А) выделяется два сейсмоакустических слоя (Б и С). Предполагается, что подошва рыхлых отложений отвечает “посткарангатской регрессии, которая соответствовала последнему оледенению” [22, с. 364].

В ряде случаев фиксируются уступы в рельефе со смещением всех сейсмоакустических слоев

[22]. Такие уступы, очевидно, отражают молодые, активные разрывные смещения.

Более детальные исследования на Джубгинском участке показали, что шельф осложнен уступами и валами. Эти уступы обычно рассматриваются в качестве абразионных [25, с. 405]. Однако они хотя бы частично могут отвечать и неотектоническим уступам разрывной природы. Три или две линии этих уступов прерывисто прослеживаются вдоль шельфа.

Указывается также, что большинство подводных каньонов связано с молодыми разрывами и что верхняя часть материкового склона до глубин 250–300 м наиболее сильно тектонически нарушена. Здесь “выявлены тектонически раздробленные ступени, субвертикальные уступы” [25, с. 403].

Следует отметить, что шельф рассматриваемой территории входит в пределы крупной зоны возможных очагов землетрясений (зоны ВОЗ) с сейсмическим потенциалом не менее $M_{\max} = 5.5$ [8, 13]. При этом большинство разрывов, выявленных сейсморазведкой, считаются сейсмоактивными. Допускается также, “что по региональным сейсмологическим данным для Западного Кавказа наиболее вероятно возникновение за период 10000 лет землетрясения с $M = 7.4$ ” [7, с. 378]. Для района г. Туапсе известно землетрясение с $M = 5.3$ [там же, с. 379]. Поэтому нельзя исключать возможность возникновения здесь сеймотектонических дислокаций при землетрясениях с максимальной магнитудой [20].

3.2. Неотектоника шельфа района Большого Сочи

Шельф рассматриваемой территории характеризуется глубинами до 200 м при ширине 5–15 км и представляет собой относительно выровненную молодой абразией поверхность, полого наклоненную от береговой линии к континентальному склону. Здесь абразией практически уничтожены плейстоценовые и более древние элементы рельефа. Поэтому геоморфологическими методами могут выявляться только самые молодые активные разрывы и линеamentы.

Методика неоструктурного районирования территории Черноморского шельфа не разработана, а представления о его строении опираются на различные концепции, по-разному подтвержденные фактическим материалом.

Основным исходным материалом для трассировки морских линеamentов служила батиметрическая карта масштаба 1:200000. На ней сечение горизонталей составляет для большей части шельфа 5 м, а для его фронтальных частей — 50 м. Поэтому в условиях достаточно выровненной молодыми эрозионными процессами поверхности шельфа удается фиксировать только наиболее крупные

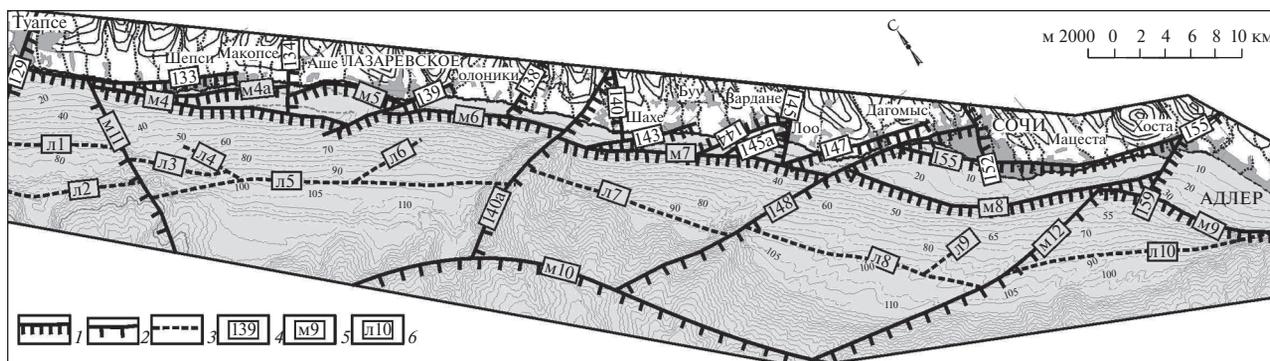


Рис. 8. Активные разрывы и линеаменты шельфовой зоны района Большого Сочи: 1–2 – активные разрывы: 1 – трассируемые на суше и переходящие на шельф, 2 – морские; 3 – морские линеаменты; 4–5 – индексы разрывов: 4 – наземных, 5 – морских; 6 – индексы линеаментов.

формы рельефа, в том числе структурно обусловленные.

На шельфе присутствуют как новейшие, т.е. активные разрывы, зафиксированные на суше, так и сопровождающиеся менее четкими перегибами в рельефе собственно шельфовые линеаменты (рис. 8).

Активные разрывы, выявленные на суше и продолжающиеся на шельфе, представлены сбросами. Для них сохранена индексация, применявшаяся ранее [13].

Шельф в рассматриваемом регионе состоит из трех основных частей, по-видимому, отвечающих продольным структурным элементам блокового типа²:

- а) прибрежная отмель с глубинами до 20–30 м и шириной 1–4 км,
- б) развитый повсеместно среднешельфовый склон на глубинах от 20–30 до 100 м, шириной порядка 4–5 км;
- в) сохранившаяся фрагментарно между верховьями подводных каньонов фронтальная часть с глубинами до 150–200 м и шириной 3–6 км.

Прямолинейность границ этих частей свидетельствует о разрывном их сочленении. Данный набор основных элементов сегментирован поперечными или диагональными разрывами и линеаментами.

Следует отметить, что общая выровненность шельфа обуславливает малую точность нанесения линеаментов. Эта выровненность связана с молодостью рельефа шельфа, которая была создана многочисленными неоплейстоценовыми

² Предшествующими исследователями также выделялись для полигона пос. Архипо-Осиповка – пос. Джубга три сходных элемента шельфа: 1) береговой или прибойный участок с глубинами до 30 м, 2) центральная шельфовая платформа между изобатами 30–70 м и 3) внешняя часть шельфа с большими глубинами [22]. Местами внешняя зона шельфа опущена до глубин 100–200 м [25, с. 403].

трансгрессиями. Последняя из них произошла в основном уже в голоцене. Поэтому на шельфе разрывные смещения орографически выражены гораздо хуже, чем на суше и на материковом склоне.

Данное обстоятельство в свою очередь свидетельствует о том, что даже слабо проявившиеся на шельфе разрывные смещения являются очень молодыми, а сами разрывы, получившие даже небольшое орографическое проявление, – весьма активными.

3.3. Характер сочленения современных орогена и шельфа

Южная прибортовая зона рассматриваемой части мегасвода Большого Кавказа детально изучена и в целом делится на две подзоны – северозападную Джанхотскую и юго-восточную Большого Сочи с рубежом в районе г. Туапсе [11–13, 17]. Поэтому необходимые соотношения в большинстве мест проявляются достаточно определенно, несмотря на то, что орография (батиметрия) подводного рельефа выявлена гораздо хуже, чем наземного.

Джанхотская подзона Южной прибортовой зоны мегасвода почти на всем своем протяжении ограничена системой достаточно крупных разрывов, трассирующихся непосредственно вдоль береговой линии. К ним относятся (с запада на восток): Западноутришский, Южноабрауский, Джанхотский, Джубгинский и Киселевский сбросы. Доказательством их пограничной роли является то, что к ним косо или торцово причленяется с севера большое число разрывов мегасвода. Так, к Западноутришскому сбросу причленяются Марфовский и Суккинский сбросы; к Южноабраускому – Дюрсинский, Большехуторской, Борисовский и Мысхакский сбросы; к Джанхотскому – Кабардинский, Яшамбайский и Мезыбский сбросы; к Джубгинскому – Красношельский, Де-

гуабский, Устьвуланский; Североджубгинский, Западнолермонтовский, Нижнешапсугский, Восточночайкинский сбросы, а к Киселевскому – Восточнокуйбышевский сброс [13, 15].

К востоку от Туапсе располагается цепь пограничных прибрежных морских разрывов (м4 – Макопсинский верхнесклоновый, м5 – Лазаревский верхнешельфовый, м6 – Южношахинский среднесклоновый и 158 – Приморскосочинский сбросы), разделенных последовательно Солониковским (139), Головинским (140а) и Южномайским (148) сбросами. Здесь также имеется ряд сбросов, причлняющихся к пограничным (например, Ашейский – 134, Шахинский – 140, Нижнебууский – 143, Учдеринский – 145 сбросы) (см. рис. 8, табл. 2). Далее к востоку граница проходит поперек Адлерской впадины.

Таким образом, практически повсеместно интенсивно раздробленный активными поднеорогенными разрывами южный край орогена Большого Кавказа сопрягается по продольным разрывам со слабо дифференцированным узким шельфом. А этот шельф южным своим краем частично заходит в пределы Южной Крымско-Кавказской флексурно-разрывной зоны и раннеорогенного Туапсинского прогиба.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изложенный выше материал позволяет выбрать из существующих противоречивых представлений явно преобладающие позиции по основным спорным вопросам о характере сочленения орогена западной части мегасвода Большого Кавказа и Черноморской мегавпадины. Так, было установлено, что на раннеорогенной стадии вдоль Южного края орогена сформировался Туапсинский краевой прогиб, выполненный аналогами майкопской серии. На позднеорогенной стадии эта раннеорогенная система структур претерпела существенные преобразования. В частности, активное разрастание Черноморской мегавпадины привело к погружению вала Шатского и большей части Туапсинского прогиба. В результате этого Туапсинский прогиб оказался перекошенным с существенно опущенным юго-западным крылом. По морфологии кровли майкопских отложений северный борт прогиба на 4–5 км приподнят над южным. В настоящее время глубина прогиба по подошве мезозоя превышает 12 км, по кровле мелла – низам палеоцена достигает 10 км, по кровле эоцена или подошве новейших моласс – 9 км, а по кровле майкопской серии или подошве позднеорогенных отложений 2–5 км.

Рассмотрение неотектоники зоны сочленения западной части мегасвода Большого Кавказа с Черноморской мегавпадиной показало, что шельф и его береговая зона формируются при

сложном воздействии этих двух крупнейших новейших структур. Наиболее характерными чертами этой зоны можно считать следующие.

1. Относительно узкий и слабо дислоцированный шельф на юго-востоке пересекает восточную часть прогиба, отделяя от него современную Адлерскую впадину. Современный шельф отличается меньшей дифференцированностью блоковых структур, чем прибрежные части мегасвода.

2. Выявлено различие раннеорогенной и позднеорогенной юго-западных границ мегасвода, свидетельствующее: 1) о погружении на позднеорогенной стадии значительной части западной периферии мегасвода, и одновременно 2) о “втягивании” в позднеорогеническое воздымание Адлерской впадины, служившей на раннеорогенной стадии восточной частью Туапсинского прогиба.

3. Надвиговая раннеорогенная граница Туапсинского прогиба в Адлерской впадине преобразовалась на позднеорогенной стадии в Воронцовскую шовно-блоковую зону [16].

4. Юго-западной границей современного шельфа и Туапсинского прогиба служит фрагмент Южной Крымско-Кавказской флексурно-разрывной шовной зоны.

5. Позднеорогенное погружение части мегасвода свидетельствует о тафрогенном воздействии расширяющейся Черноморской депрессии на ороген Большого Кавказа; в четвертичном периоде это воздействие проявилось также в прогибании краевых, поперечных к оси мегасвода тафрогенных грабен (Суккинского, Абраудюрсинского, Новороссийского, Геленджикского, Кричного, Лермонтовского, Куйбышевского (Агойского), Кичмайского совместно с Устьшахейским, Мачестинского [13, 15]). Не исключена тафрогенная природа и для ряда диагональных к побережью грабен, раскрывающихся в сторону моря.

6. Узость зоны развития неоплейстоценовых морских террас Черноморского побережья свидетельствует о разрывной природе сочленения современного шельфа с краем орогена Большого Кавказа. Современная подвижность этого сочленения подтверждается его повышенной сейсмической активностью, особенно явной на юго-восточном его фланге, где к этому Прибрежному комплексу разрывов тяготеет ось фокальной зоны Сочинского роя землетрясений [5]. Сейсмичность северо-западного фланга данного сочленения подтверждается также сейсмотектоническими структурами Абрауского полусвода (район Малого и Большого Утришей и др.). Некоторые исследователи предполагают здесь “тотальную сейсмотектоническую переработку” рельефа побережья [19].

Все сказанное выше о характере сочленения орогена западной части мегасвода Большого Кавказа и Черноморской мегавпадины необходимо

учитывать при инженерных изысканиях и строительном проектировании для оценки тектонической опасности и прогноза современной активности разрывных смещений, в том числе, смещений за срок службы проектируемых и функционирующих инженерных сооружений; выявления сейсмогенерирующих структур, как основы для выделения зон возникновения очагов землетрясений (зон ВОЗ); при поисках водоносных структур, а также для построения количественных палеогеографических и палеоэкологических реконструкций различного назначения.

Статья подготовлена в рамках выполнения государственного задания и плана НИР по теме № г.р. АААА-А19-119022190076-9.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бархатов И.И., Несмеянов С.А., Шмидт Г.А. Геолого-геофизические материалы для выделения сейсмогенерирующих структур Северо-Западного Кавказа и смежных областей // Матер. по сейсмическому районированию Северо-Западного Кавказа. М.: Наука, 1991. С. 44–80.
2. Баскакова Г.В., Никишин А.М. Выделение основных тектонических событий по данным 2Д–3Д сейсморазведки в районе Туапсинского и Керченско-Таманского прогибов и прилегающих территорий // Проблемы тектоники континентов и океанов. Матер. LI Тектонического совещания. М.: ГЕОС, 2019. Т. 1. С. 60–64.
3. Геология СССР. Т. 10. Грузинская ССР. Ч. 1. М.: Недра, 1964. 656 с.
4. Геология СССР. Т. 9. Северный Кавказ. Ч. 1. М.: Недра, 1968. 759 с.
5. Землетрясения в СССР в 1971 г. М.: Наука, 1975. 240 с.
6. Лобковский Л.И., Мерклин Л.Р., Ковачев С.А. и др. Изучение сейсмичности дна Черного моря на участке трассы газопровода Джубга – Самсун с помощью донных сейсмических станций. М.: ЦИОБ, 1999. 246 с.
7. Лобковский Л.И., Кузин И.П., Ковачев С.А. Детальные сейсмологические исследования с донными сейсмографами у Кавказского побережья Черного моря // Комплексные исследования северо-восточной части Черного моря. М.: Наука, 2002. С. 373–380.
8. Материалы по сейсмическому районированию Северо-Западного Кавказа. М.: Наука, 1991. 100 с.
9. Мейснер А.Л. Основные разломы вала Шатского и их влияние на формирование структуры Восточно-Черноморского региона // Вестник МГУ. Сер. 4. Геология. 2009. № 4. С. 14–19.
10. Мейснер Л.Б., Туголесов Д.А. Туапсинский прогиб – впадина с автономной складчатостью // Геотектоника. 1998. № 5. С. 76–85.
11. Несмеянов С.А. Основные черты неоструктурного районирования Северо-Западного Кавказа // ДАН СССР. 1986. Т. 291. № 6. С. 1449–1453.
12. Несмеянов С.А. Приповерхностные новейшие структуры Северо-западного Кавказа и смежных областей // Матер. по сейсмическому районированию Северо-Западного Кавказа. М.: Наука, 1991. С. 4–44.
13. Несмеянов С.А. Неоструктурное районирование Северо-Западного Кавказа (опережающие исследования для инженерных изысканий). М.: Недра, 1992. 254 с.
14. Несмеянов С.А. Оротектонический метод. М.: ООО “Миттель Пресс”, 2017. 376 с.
15. Несмеянов С.А. при участии Г.А. Андреевой, И.И. Бархатова, Т.С. Бондаревой, Л.Т. Лютой. Неоструктурное районирование Северо-Западного Кавказа. Карта м-ба 1:200 000 М.: ПНИИИС, 1995. 40 листов.
16. Несмеянов С.А., Воейкова О.А. Неотектоника Воронцовской зоны и проблема молодых надвигов на Западном Кавказе // Геоэкология. 2020. № 4. С. 3–20.
17. Несмеянов С.А., Измайлов Я.А. Тектонические деформации черноморских террас Кавказского побережья России (опережающие исследования для инженерных изысканий). М.: ПНИИИС, 1995. 239 с.
18. Несмеянов С.А., Шмидт Г.А., Шеглов А.П. Морфо-структурное положение сейсмодислокаций южного склона Западного Кавказа // Геоморфология. 1987. № 3. С. 74–79.
19. Попков В.И., Крицкая О.Ю., Остапенко А.А., Дементева И.Е., Быхалова О.Н. О тотальной сеймотектонической переработке южного склона Северо-западного Кавказа // ДАН. 2017. Т. 476. № 4. С. 431–434.
20. Рекомендации по сейсмическому микрорайонированию при инженерных изысканиях для строительства. М.: ПНИИИС, 1985. 73 с.
21. Тектоника мезокайнозойских отложений Черноморской впадины / Кол. авт.: Д.А. Туголесов, А.С. Горшков, Л.М. Мейснер и др. М.: Недра, 1985. 215 с.
22. Торгунаков А.В., Мерклин Л.Р., Шимкус К.М. и др. Новые представления о строении шельфа Кавказского побережья от пос. Архипо-Осиповка до пос. Джубга по данным высокоразрешающего сейсмоакустического профилирования // Комплексные исследования северо-восточной части Черного моря. М.: Наука, 2002. С. 358–367.
23. Туголесов Д.А., Соловьев В.В. Тектоника и сейсмичность прикавказской части Черного моря // Отечественная геология. 1995. №8. С. 37–46.
24. Шимкус К.М., Маловицкий Я.П., Шуменко С.И. Коренные породы со дна Черного моря // Геолого-геофизические исследования Средиземного и Черного морей. М.: Изд-во Института Океанологии АН СССР, 1979. С. 26–44.
25. Шимкус К.М., Москаленко В.Н., Евсюков Ю.Д., Лобковский Л.Т., Торгунаков А.В., Мерклин Л.Р. О роли неотектоники оползневых и эрозивно-аккумулятивных процессов в формировании прикавказской материковой окраины // Комплексные исследования северо-восточной части Черного моря. М.: Наука, 2002. С. 402–416.

NEOTECTONICS OF CONJUNCTION ZONE BETWEEN THE GREATER CAUCASUS MEGAVULT AND THE BLACK SEA MEGADEPRESSION

S. A. Nesmeyanov^a and O. A. Voeykova^{a,*}

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

**E-mail: voa49@mail.ru*

The conjunction between the Greater Caucasus megavault and the Black Sea megadepression was previously interpreted as a subduction zone, a thrust, steep flexure, and a **flexure-fault** zone. Interpretation of the development history of these two conjugated megastructures should be based on the detailed geological-geophysical and geomorphological data. The orotectonic analysis permitted us to distinguish between the early and late orogenic southwestern boundaries of the megavault. The early orogenic megavault side of the Greater Caucasus includes its boundary with the Tuapse foredeep filled with the Oligocene-Miocene deposits of the Maikopian Series. At the late orogenic stage, a significant part of the western periphery of the megavault sank and the Adler Depression rose. At the early orogenic stage, this depression was the eastern part of the Tuapse foredeep. The neostuctural zoning of the modern shelf is suggested, showing a lower differentiation of block structures than the coastal parts of the megavault. The border between the modern shelf and the Tuapse foredeep is a fragment of the South Crimean-Caucasian flexural-discontinuous suture zone. Late orogenic subsidence of the megavault part indicates the taphrogenic effect of the expanding Black Sea megadepression on the Greater Caucasus orogen. In the Quaternary period, this effect was manifested in the activation of superimposed, mainly transverse grabens.

Keywords: *megavault, megadepression, orogen, shelf, foredeep, graben, overthrust, flexure-fault zone, neotectonic stage, early orogenic and late orogenic stages, orotectonic method*

REFERENCES

1. Barkhatov, I.I., Nesmeyanov, S.A., Shmidt, G.A. *Geologo-geofizicheskie materialy dlya vydeleniya seismogeneriruyushchikh struktur Severo-Zapadnogo Kavkaza i smezhnykh oblastei* [Geological and geophysical materials for outlining seismogenerating structures in the Northwestern Caucasus and the adjacent areas]. *Materialy po seismicheskomu raionirovaniyu Severo-Zapadnogo Kavkaza* [Materials on seismic zoning of the North-West Caucasus]. Moscow, Nauka Publ. 1991. P. 44–80. (in Russian)
2. Baskakova, G.V., Nikishin, A.M. *Vydelenie osnovnykh tektonicheskikh sobytij po dannym 2D-3D seismorazvedki v raione Tuapsinskogo i Kerchensko-Tamanskogo progibov i prilgayushchikh territorii* [Identification of the main tectonic events according to 2D-3D seismic survey in the area of the Tuapse and Kerch-Taman troughs and adjacent territories]. *Problemy tektoniki kontinentov i okeanov. Materialy LI Tektonicheskogo soveshchaniya* [Problems of tectonics of continents and oceans. Proc. LI Tectonic workshop]. Moscow, GEOS Publ., 2019. V. 1. P. 60–64. (in Russian)
3. *Geologiya SSSR, Gruzinskaya SSR*. [Geology of the USSR. Georgian SSR]. V. 10. Part 1, Moscow, Nedra Publ., 1964, 656 p. (in Russian)
4. *Geologiya SSSR. Severnyy Kavkaz* [Geology of the USSR. The Northern Caucasus]. V. 9. Part 1. Moscow, Nedra Publ., 1968, 759 p. (in Russian)
5. *Zemletryaseniya v SSSR v 1971 g.* [Earthquakes in the USSR in 1971]. Moscow, Nauka Publ., 1975, 240 p. (in Russian)
6. Lobkovskii, L.I., Merklin, L.R., Kovachev, S.A. et al. *Izucheniye seismichnosti dna Chernogo morya na uchastke trassy gazoprovoda Dzhubga–Samsun s pomoshch'yu donnykh seismicheskikh stantsii* [Seismicity study at the Black Sea bottom within the section of the Dzhubga-Samsun gas pipeline route using the bottom seismic stations]. Moscow, TsIOB Publ., 1999, 246 p. (in Russian)
7. Lobkovskii, L.I., Kuzin, I.P., Kovachev, S.A. *Detal'nye seismologicheskie issledovaniya s donnymi seismografami u Kavkazskogo poberezh'ya Chernogo morya* [Detailed seismologic studies with bottom seismic stations near the Caucasian coast of the Black Sea]. *Kompleksnye issledovaniya severo-vostochnoi chasti Chernogo morya* [Comprehensive studies in the northeastern part of the Black Sea]. Moscow, Nauka Publ., 2002. P. 373–380. (in Russian)
8. *Materialy po seismicheskomu raionirovaniyu Severo-Zapadnogo Kavkaza* [Materials on seismic zoning of the Northwestern Caucasus]. Moscow, Nauka Publ., 1991, 100 p. (in Russian)
9. Meisner, A.L. *Osnovnye razlomy vala Shatskogo i ikh vliyaniye na formirovaniye struktury Vostochno-Chernomorskogo regiona* [The main faults of the Shatsky rampart and their influence on the formation of the structure in the East Black Sea region]. *Vestnik MGU, Ser. 4, Geologiya*. 2009. № 4. P. 14–19. (in Russian)
10. Meisner, L.B., Tugolesov, D.A. *Tuapsinskii progib – vpadina s avtonomnoi skladchatost'yu* [Tuapse foredeep as a depression with autonomous folding]. *Geotektonika*, 1998. № 5. P. 76–85. (in Russian)
11. Nesmeyanov, S.A. *Osnovnye cherty neostrukturnogo raionirovaniya Severo-Zapadnogo Kavkaza* [The main features of the neostuctural zoning of the North-West Caucasus]. *DAN SSSR*, 1986. V. 291. № 6. P. 1449–1453. (in Russian)
12. Nesmeyanov, S.A. *Prioverkhnostnye noveishie struktury Severo-zapadnogo Kavkaza i smezhnykh oblastei* [Near-surface recent structures of the North-West Caucasus and adjacent areas]. *Materialy po seismichesk-*

- komu raionirovaniyu Severo-Zapadnogo Kavkaza* [Materials on seismic zoning of the North-West Caucasus]. Moscow, Nauka Publ., 1991. P. 4–44. (in Russian)
13. Nesmeyanov, S.A. *Neostrukturalnoe raionirovanie Severo-Zapadnogo Kavkaza (operezhayushchie issledovaniya dlya inzhenernykh izyskaniy)* [Neostuctural zoning of the North-West Caucasus (preliminary study for engineering surveys)]. Moscow, Nedra Publ., 1992, 254 p. (in Russian)
 14. Nesmeyanov, S.A. *Orotektonicheskii metod* [Orotectonic method] Moscow, Mittel Press, 2017, 376 p. (in Russian)
 15. Nesmeyanov, S.A. et al. *Neostrukturalnoe raionirovanie Severo-Zapadnogo Kavkaza. Karta m-ba 1 : 200000* [Neostuctural zoning of the Northwestern Caucasus. The map of a scale 1 : 200 000]. Moscow, PNIIS Publ., 1995. (in Russian)
 16. Nesmeyanov, S.A., Voeikova, O.A. *Neotektonika Vorontsovskoi zony i problema molodykh nadvigov na Zapadnom Kavkaze* [Neotectonics of the Vorontsovskaya zone and the problem of young thrusts in the Western Caucasus]. *Geoekologiya*, 2020. № 4. P. 3–20. (in Russian)
 17. Nesmeyanov, S.A., Izmailov, Ya.A. *Tektonicheskie deformatsii chernomorskikh terras Kavkazskogo poberezh'ya Rossii (Operezhayushchie issledovaniya dlya inzhenernykh izyskaniy)* [Tectonic deformations of the Black Sea terraces of the Caucasian coast of Russia (Advanced research for engineering surveys)]. Moscow, PNIIS Publ., 1995, 239 p. (in Russian)
 18. Nesmeyanov, S.A., Shmidt, G.A., Shcheglov, A.P. *Morfostrukturalnoe polozhenie seismodislotsii yuzhnogo sklona Zapadnogo Kavkaza* [Morphostructural position of seismic dislocations on the southern slope of the Western Caucasus]. *Geomorfologiya*, 1987. № 3. P. 74–79. (in Russian)
 19. Popkov, V.I., Kritskaya, O.Yu., Ostapenko, A.A., Dement'eva, I.E., Bykhalova, O.N. *O total'noi seismotektonicheskoi pererabotke yuzhnogo sklona Severo-zapadnogo Kavkaza* [On the total seismotectonic processing of the southern slope of the Northwest Caucasus]. *DAN*, 2017. V. 476. № 4. P. 431–434. (in Russian)
 20. *Rekomendatsii po seismicheskomu mikroraiionirovaniyu pri inzhenernykh izyskaniyakh dlya stroitel'stva* [Recommendations for seismic microzoning during engineering surveys for construction. Moscow, PNIIS Publ., 1985, 73 p. (in Russian)]
 21. Tugolesov, D.A., Gorshkov, A.S., Meisner, L.M. *Tektonika mezo-kainozoiskikh otlozhenii Chernomorskoj vpadiny* [Tectonics of the Mesozoic-Cenozoic sediments of the Black Sea basin. Moscow, Nedra Publ., 1985, 215 p. (in Russian)]
 22. Torgunakov, A.V., Merklin, L.R., Shimkus, K.M. et al. *Novye predstavleniya o stroenii shel'fa Kavkazskogo poberezh'ya ot pos. Arkhipo-Osipovka do pos. Dzhubga po dannym vysokorazreshayushchego seismoakusticheskogo profilirovaniya* [New ideas about the construction of the shelf of the Caucasus coast from Arkhipo-Osipovka to Dzhubga settlements according to high-resolution seismic-acoustic profiling]. *Kompleksnye issledovaniya severo-vostochnoi chasti Chernogo morya* [Comprehensive studies of the northeastern part of the Black Sea]. Moscow, Nauka, 2002. P. 358–367. (in Russian)
 23. Tugolesov, D.A., Solov'ev, V.V. *Tektonika i seismichnost' prikavkazskoi chasti Chernogo morya* [Tectonics and seismicity of the near-Caucasian part of the Black Sea]. *Otechestvennaya geologiya*, 1995. № 8. P. 37–46. (in Russian)
 24. Shimkus, K.M., Malovitskii, Ya.P., Shumenko, S.I. *Korennye porody so dna Chernogo morya* [Bedrocks from the bottom of the Black Sea]. *Geologo-geofizicheskie issledovaniya Sredizemnogo i Chernogo morei* [Geological and geophysical studies of the Mediterranean and Black Seas]. Moscow, Institute of Oceanology, USSR Academy of Sciences, 1979. P. 26–44. (in Russian)
 25. Shimkus, K.M., Moskalenko, V.N., Evsyukov, Yu.D., Lobkovskii, L.T., Torgunakov, A.V., Merklin, L.R. *O roli neotektoniki opolznevnykh i erozionno-akkumulativnykh protsessov v formirovanii prikavkazskoi materikovoï okrainy* [On the role of neotectonics of landslide and erosion-accumulative processes in the formation of the Pre-Caucasian continental margin]. *Kompleksnye issledovaniya severo-vostochnoi chasti Chernogo morya* [Integrated studies of the northeastern Black Sea]. Moscow, Nauka Publ., 2002. P. 402–416. (in Russian)

ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

УДК 556.535.6:62.626.35

СТОК ВЛЕКОМЫХ НАНОСОВ РЕК ЧЕРНОМОРСКОГО ПОБЕРЕЖЬЯ КРАСНОДАРСКОГО КРАЯ

© 2021 г. В. А. Петров^{1,*}, Н. А. Ярославцев¹

¹ ОПАО ЦНИИТС Научно-исследовательский центр “Морские берега”,
ул. Яна Фабрициуса, 1, г. Сочи, 354002 Россия

*E-mail: demmi8@mail.ru

Поступила в редакцию 25.01.2021 г.

После доработки 01.03.2021 г.

Принята к публикации 09.03.2021 г.

При сохранении оставшихся и восстановлении размытых галечных пляжей на Черноморском побережье Краснодарского края, в том числе на участке берега между Туапсе и Адлером, необходимо учитывать твердый сток рек, неточные данные по которому могут негативно отразиться на рекомендуемые берегозащитные мероприятия. В естественных условиях до возведения портов, берегозащитных сооружений и выборки аллювиальных отложений из рек и пляжей стабильное состояние пляжей обеспечивалось равенством приходных и расходных составляющих баланса наносов в береговой зоне. В приходной части основной объем пляжеобразующего материала составляли крупнообломочные наносы, выносимые многочисленными водотоками. Поступление от абразионных процессов было незначительным. Расходная составляющая определялась истиранием пляжного материала при его перемещении под воздействием волн и, отчасти, уходом во вдольбереговом потоке за пределы рассматриваемого участка берега. На основе балансового расчета уточняются величины стока пляжеобразующего материала крупностью более 2 мм рек Черноморского побережья Краснодарского края, содержащиеся в работе Г.Н. Хмаладзе [11] и, отчасти, В.В. Ромашина [8]. Выполненные расчеты свидетельствуют о завышении величины твердого стока у Г.Н. Хмаладзе в 2, а у В.В. Ромашина – 1.7 раза. Антропогенное вмешательство в русловые процессы, связанное с канализацией русел и выборкой аллювиального материала, уменьшило объем наносов, выносимый реками. Современную величину твердого стока возможно оценить по объемам материала, аккумулирующегося в береговой зоне вблизи устьев рек, в том числе и в бунных комплексах. Бунные комплексы, расположенные ниже устьев рек относительно направления вдольберегового потока наносов, в межбунные отсеки которых не производилась отсыпка пляжеобразующего материала, аккумулируют наносы, выносимые реками, что приводит к возникновению и продвижению низовых размывов. При существенном сокращении твердого стока рек это обуславливает неравномерное распределение ширины пляжа вдоль берега, которое также сопряжено и с возведением поперечных преград неоправданной длины.

Ключевые слова: баланс пляжеобразующих наносов, вдольбереговой поток, истирание галечных наносов, пляж, твердый сток рек

DOI: 10.31857/S0869780921030073

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия на Кавказском побережье Краснодарского края усилились темпы деградации волногасящих галечных пляжей, защищающих берег от воздействия волн, в том числе полотно железной дороги и рекреационные объекты, расположенные между Туапсе и Адлером. Это предопределяет необходимость проведения эффективных берегозащитных мероприятий, соответствующих современным природоохранным, экологическим и рекреационным требованиям. Этому в полной мере отвечают природные и искусственные волногасящие галечные пляжи. Эффективность создаваемых берегозащитных пля-

жей во многом будет определяться достоверной оценкой баланса наносов при их проектировании. Основная приходная составляющая баланса наносов на участке берега между Туапсе и Адлером – твердый сток рек. В твердом стоке следует учитывать объемы выноса на берег наносов крупностью более 2 мм, определяющими пляжеобразующими фракциями галечных пляжей данного региона.

Наиболее полные данные по твердому стоку рек Черноморского побережья Краснодарского края приводятся в работах Г.Н. Хмаладзе [11] и В.В. Ромашина [8]. По данным Г.Н. Хмаладзе [11], среднегодовалая ежегодная величина сто-

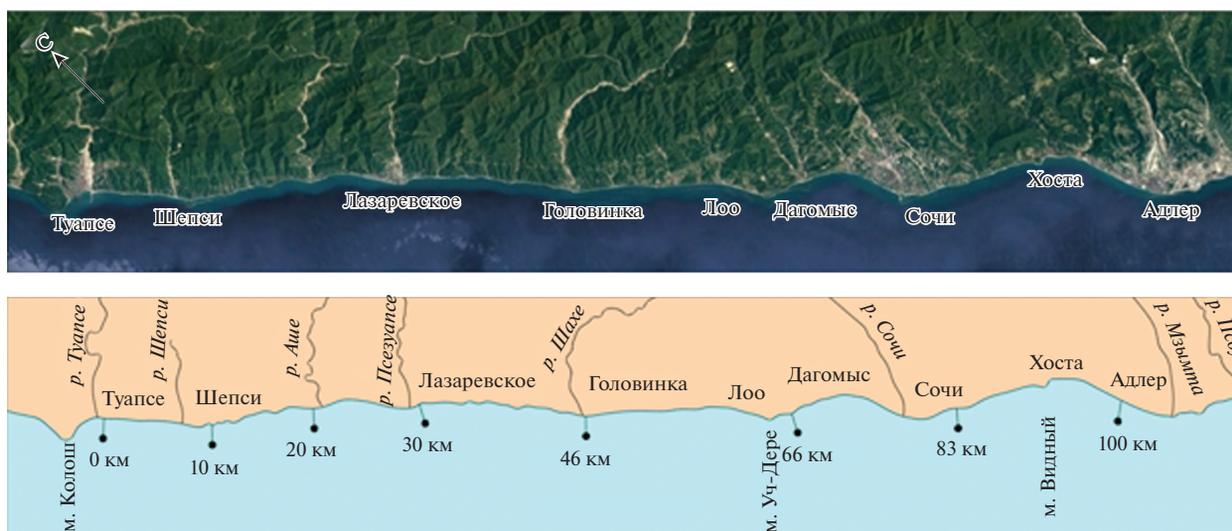


Рис. 1. Карта-схема берега между Туапсе и Адлером. Цифрами указаны расстояния от Туапсе.

ка наносов крупнее 2 мм по всем значимым водотокам на участке берега от Туапсе и до устья р. Мзымта, впадающей в море в Адлере, в естественных условиях составляла 516.6 тыс. т. или 303.9 тыс. м³. По данным В.В. Ромашина [8], величина стока пляжеобразующих наносов меньше — до 259.5 тыс. м³. Ранее А.М. Жданов [5] ежегодное поступление наносов из рек на этом участке берега в естественных условиях определил в объеме 150.0 тыс. м³.

Анализ береговых процессов, протекающих на рассматриваемом участке берега, свидетельствует о завышении величины стока, представленных в работах [8] и [11].

Литодинамические исследования, выполняемые при обосновании берегозащитных мероприятий с созданием волногасящих галечных пляжей на участке берега между Туапсе и Адлером, сопряженные с анализом поступления из рек пляжеобразующего материала и его распределением вдоль берега, свидетельствуют о завышении величины стока, представленных в работах [8] и [11].

В естественных условиях до возведения портов и берегозащитных комплексов и при отсутствии выборки наносов с пляжей и русел рек, рассматриваемый участок берега окаймляли широкие галечные пляжи, находящиеся в относительно равновесном состоянии. Относительная динамическая стабильность пляжа определялась вдольбереговым потоком галечных наносов, начинающимся от Туапсе и идущим в юго-восточном направлении до Абхазии. При своем движении поток, не прерываясь, обходил естественные преграды в виде небольших мысов (Уч-Дере, Видный и ряд других).

Устойчивость и ширина пляжей на конкретных участках берега зависела от соотношения поступления пляжеобразующего материала из рек, его истиранием, приходом и уходом за пределы рассматриваемого участка берега во вдольбереговом потоке. По мере своего движения вдольбереговой поток постоянно пополнялся выносами рек, многочисленных ручьев и временных водотоков (рис. 1). В естественных условиях для всего участка берега между Туапсе и Адлером в баланс наносов определяющими составляющими являлись твердый сток рек и потери в результате истирания галечных наносов, перемещаемых вдоль берега под воздействием волн. Величина вдольберегового потока на входе участка берега у Туапсе была равна нулю из-за полного его перехвата далеко выдвинутым в море мысом Колош, расположенным в 3.3 км северо-западнее Туапсе, и огражденным юго-восточным молом Туапсинского порта. На выходе у устья р. Мзымта ежегодная величина потока не превышала 10 тыс. м³. До возведения волноотбойных стен, которые в настоящее время прикрыли береговой откос на протяжении почти 82% длины рассматриваемого участка берега, часть пляжеобразующего материала в береговую зону могла попадать в результате донной и береговой абразии.

Таким образом, твердый сток рек на участке берега от Туапсе до устья р. Мзымта в естественных условиях может быть оценен по объему истирания галечного материала, его поступлению в результате абразионных процессов и величине потока наносов, проходящего через устье р. Мзымта.

Перехват наносов, выносимых реками и перемещающихся во вдольбереговом потоке бунными комплексами, возведенными вблизи устьев рек, в межбунные отсеки которых не производилась от-

сыпка пляжеобразующего материала, приводит к возникновению и распространению низовых размывов и неравномерному распределению вдоль берега ширины галечного пляжа.

Антропогенное вмешательство в естественные русловые процессы, связанное с канализацией русел и выборкой руслового аллювия, существенным образом отразилось на сокращении стока крупнообломочного материала. Современную величину твердого стока на участке берега между Туапсе и Адлером возможно оценить по объему истирания наносов на протяжении стабильных участков аккумулятивных выступов рек.

Выполненные исследования по оценке литодинамических условий береговой зоны на участке берега между Туапсе и Адлером проводились с целью:

- определения величины стока пляжеобразующих наносов крупностью более 2 мм рек Черноморского побережья Краснодарского края на участке берега между Туапсе и Адлером до активного антропогенного вмешательства в природные процессы (конец 1940-х – начало 1950-х гг.);

- определения современного твердого стока рек в условиях усиливающегося антропогенного вмешательства в береговые и русловые процессы;

- уточнения ранее опубликованных данных по твердому стоку рек рассматриваемого региона;

- оценки современного состояния галечного пляжа и берегозащитных сооружений;

- оценки влияния уменьшения твердого стока рек и нерационального проведения берегозащитных мероприятий на состояние галечных пляжей на рассматриваемом участке берега.

Проведенные исследования выполнены на основе балансового метода, включающего анализ приходных и расходных его составляющих с использованием последних данных по вдольбереговому потоку и истиранию галечных наносов. Полученные результаты сравнивались с ранее опубликованными данными. Анализ динамики состояния галечных пляжей выполнен по результатам сравнения современного их состояния, полученного по детальным обследованиям пляжной полосы и берегозащитных сооружений, выполненным авторами в 2018–2019 гг. с данными за предыдущие годы.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В естественных условиях ежегодная величина пополнения пляжей крупнообломочными наносами от абразии берега и дна на участке берега от Туапсе до Адлера не превышала 20.0 тыс. м³ [5]. Общие потери на истирание гравийно-галечного материала при его перемещении под воздействием волн в пределах рассматриваемого участка бе-

рега можно оценить с учетом его протяженности и удельных потерь, приходящихся на 1 км береговой линии.

По А.М. Жданову [4], объем потерь пляжеобразующего материала на 1 км берега в зависимости от прочности пород, выносимых реками на берег, изменяется от 900 до 1600 м³. Н.Н. Федоровский [10] величину потерь на 1 км берега принимает равной 1.7 тыс. м³ в год. У Е.К. Гречищева [1] эта величина колеблется от 1.0 до 1.3 тыс. м³ в год. По расчетам, выполненным в [9], величина потерь на истирание пляжеобразующего материала на 1 км берега от Туапсе до Адлера равна 1.55 тыс. м³.

Имея в виду выше приведенные значения, для дальнейшего анализа удельная величина потерь объема наносов на 1 км берега принимается равной 1.5 тыс. м³ в год. Тогда ежегодные потери объема пляжного материала на истирание при длине рассматриваемого участка берега равной 105.1 км, составят 157.7 тыс. м³. Как было отмечено выше, объем наносов, уходящий во вдольбереговом потоке за пределы устья р. Мзымта в естественных условиях, не превышал 10.0 тыс. м³ в год. Следовательно, общие потери, определяющие расходную часть баланса на участке берега от Туапсе до устья р. Мзымта в естественных условиях, составляли 167.7 тыс. м³ в год. Из равенства в балансовых расчетах приходных и расходных его частей следует, что ежегодный объем крупнозернистых наносов, выносимый водотоками на берег, включая материал, поступающий на пляжи от абразионных процессов (20.0 тыс. м³ в год), должен был составлять 147.7 тыс. м³. Полученная расчетная величина очень близка к твердому стоку рек, определенному А.М. Ждановым [5].

При величине твердого стока рек по источнику [11], равной 303.9 тыс. м³ в год, потери на истирание наносов для сохранения нулевого баланса должны увеличиться до 3 тыс. м³ на 1 км берега, что явно не соответствует действительности. Можно предположить, что значения твердого стока рек по данным Г.Н. Хмаладзе [11] и В.В. Ромашина [8] завышены. На это обращает внимание в своей работе и Ш.В. Джаошвили [3], который отмечал двукратное завышение в источнике [11] величины твердого стока р. Мзымта.

Использование данных по твердому стоку рек, выпадающих в море между Туапсе и Адлером, взятых из источников [11] и [8], могут привести к ошибкам при литодинамических исследованиях и назначении берегозащитных мероприятий.

Выполненные расчеты свидетельствуют, что данные по стоку рек, помещенные в работе [11], необходимо уменьшить в 2 раза, а в работе [8] – в 1.7 раза.

В табл. 1 (столбец 3) приводятся данные по величине объемов выноса реками наносов крупнее 2 мм по источнику [11] в естественном состоянии русел, т.е. не затронутых выборкой руслового аллювия, а в столбце 4 – значения, полученные по балансовому расчету.

Ранее, до начала строительства в 1914 г. железной дороги Туапсе–Сочи, берег был окаймлен сплошной полосой галечного пляжа, средняя ширина которого составляла 32 м. Наиболее полные данные по ширине галечных пляжей можно найти в материалах изысканий, выполненных перед началом строительства железной дороги. В естественных условиях береговая зона от Туапсе до Абхазии представляла собой единую литодинамическую систему, устойчивость пляжей в которой поддерживалась вдольбереговым потоком наносов, пополняемым по мере своего продвижения твердым стоком рек, основными из которых являлись Аше, Псезуапсе, Шахе, Сочи и Мзымта.

Возведение в 1936 г. оградительных молов Сочинского порта, в 1980-х гг. парусного центра при проведении летней олимпиады, а в начале 2000-х гг. – Имеретинского порта, расположенного в 130 м юго-восточнее устья р. Мзымта, прервало единый вдольбереговой поток галечных наносов. Береговая зона оказалась разделенной на обособленные литодинамические подсистемы, состояние пляжей в которых определялось не единым вдольбереговым потоком, а выносами рек, впадающих в море в их пределах. Существенное влияние на вдольбереговое перемещение материала и сокращение ширины галечного пляжа оказали берегозащитные мероприятия, защищающие береговой откос и железную дорогу от штормового воздействия волн, особенно возведение бун и волноломов, а также выдвигание на пляжную зону рекреационных объектов.

Катастрофические последствия на состояние галечных пляжей оказала выборка аллювиальных отложений из пляжей и русел рек на строительство различного рода народнохозяйственных объектов [2, 8]. Так, к середине 1970-х гг. только из русел наиболее крупных рек Туапсе, Аше, Псезуапсе, Шахе и Сочи было выбрано около 9 млн м³ аллювиальных отложений. Устройство карьеров по изъятию материала непосредственно с пляжей повлияло на то, что выносы рек не могли поддерживать пляжи в стабильном состоянии. К середине 1950-х гг. их средняя ширина на участке берега между Туапсе и Адлером по сравнению с 1914 г. уменьшилась почти вдвое и составила 17 м, при этом на протяжении 10.8 км пляж был полностью размыт [12]¹. К 1966 г. средняя ширина пляжа на рассматриваемом участке берега сократилась до

14.6 м. Принятые на правительственном уровне в конце 1960-х гг. меры, запрещающие выборку материала с пляжей и русел рек, и производимые отсыпки пляжеобразующих наносов, способствовали стабилизации пляжной полосы и некоторому ее расширению. К середине 1970-х гг. средняя ширина пляжа увеличилась до 18.2 м. Интенсивное изъятие наносов с русел рек, начавшееся с 1990-х гг. существенно подорвало сток пляжеобразующего материала, и к концу этого десятилетия средняя ширина пляжа на участке берега между Туапсе и устьем р. Мзымта уменьшилась до 17.9 м. Значительное сокращение изъятий наносов из русел рек после 2010 г. привело к некоторому восстановлению ширины пляжа.

По детальным обследованиям состояния берега и берегозащитных сооружений между Туапсе и Адлером, выполненным в октябре–ноябре 2018 г., средняя ширина пляжа на этом участке равнялась 19.8 м. Наряду с этим, общая протяженность участков берега без пляжа увеличилась до 14.5 км, что составляет 13.8% от общей протяженности береговой линии, а галечные пляжи с шириной менее 5 м распространены еще на 4.9 км (4.7%). Следовательно, из 105 км протяженности берега между Туапсе и Адлером в настоящее время галечный пляж на 19.4 км (18.5%) отсутствует или же его ширина не превышает 5 м. И это, несмотря на то, что к настоящему времени на этом участке берега возведено 774 бетонных и каменнонабросных пляжеудерживающих бун, из которых 670 расположено в пределах города-курорта Сочи. В среднем на каждые 136 м длины берега приходится по одной буне. Протяженность пляжей с шириной более 15 м, по данным выполненных обследований, составляет 63.2 км (60.1%). Таким образом, почти на 40% береговой линии между Туапсе и Адлером ширина галечного пляжа оказалась менее 15 м, что недостаточно для необходимого волногашения и может привести к возникновению аварийных ситуаций, угрожающих нормальной эксплуатации железнодорожного транспорта и рекреационных объектов.

Не смотря на отсыпки привозного пляжеобразующего материала, основным источником пополнения пляжей наносами остается твердый сток рек. Последствия изъятий материала из русел рек, сказавшиеся на сокращении их твердого стока, проявляются в настоящее время и не прекратятся в ближайшем будущем. В связи с этим немаловажное значение приобретает оценка фактической современной величины твердого стока рек.

Современный объем крупнозернистых наносов, выносимых реками, можно оценить по аккумулятивным выступам рек, включая галечные пляжи, сформированные в бунных комплексах, расположенных вблизи устьев рек ниже по ходу

¹ Здесь и далее по тексту под средней шириной пляжа понимается ширина в пределах всей длины рассматриваемого фрагмента берега, включая и участки без пляжа.

Таблица 1. Сток наносов крупнее 2 мм на участке берега от Туапсе до устья р. Мзымта (тыс. м³/год)

№ п/п	Река	Сток наносов крупнее 2 мм		
		естественный по Г.Н. Хмаладзе [11]	естественный по балансовому расчету	современный
1	2	3	4	5
1	Туапсе	21.7	10.8	4.8
2	Междуречье	3.3	1.6	1.6
3	Шепси	7.4	3.7	3.5
4	Междуречье	2.8	1.4	1.4
5	Макопсе	6.3	3.2	3.2
6	Неожиданная	1.7	0.8	0.8
7	Аше	27.7	13.8	9.6
8	Куапсе	3.7	1.8	1.8
9	Свирская	1.5	0.7	0.7
10	Псезуапсе	33.6	16.8	12.5
11	Междуречье	0.7	0.4	0.4
12	Цусхвадж	5.5	2.8	2.7
13	Междуречье	0.6	0.3	0.3
14	Чухукт	2.7	1.4	1.4
15	Междуречье	0.2	0.1	0.1
16	Чимит	6.2	3.1	2.5
17	Междуречье	1.2	0.6	0.6
18	Шахе	68.8	34.4	24.4
19	Междуречье	2.7	1.3	1.3
20	Буу	2.8	1.4	1.4
21	Хобза	3.7	1.9	1.9
22	Лоо	6.0	3.0	2.5
23	Междуречье	1.8	0.9	0.9
24	Дагомыс	9.6	4.8	2.7
25	Мамайка	2.7	1.4	1.4
26	Сочи	40.5	20.3	10.9
27	Междуречье	0.5	0.3	0.3
28	Бзугу	1.4	0.7	0.7
29	Междуречье	0.1	0.05	0.05
30	Мацеста	7.8	3.9	3.1
31	Агура	2.0	1.0	1.0
32	Междуречье	1.5	0.7	0.7
33	Хоста	13.3	6.6	4.9
34	Междуречье	0.1	0.05	0.05
35	Кудепста	9.2	4.6	2.2
36	Междуречье	0.26	0.13	0.13
37	Херота	1.6	0.8	0.8
38	Междуречье	0.2	0.1	0.1
	Сумма	303.36	151.63	109.33



Рис. 2. Аккумуляция наносов, выносимых р. Туапсе в пределах бунного комплекса.



Рис. 3. Современный аккумулятивный выступ р. Аше.

потока наносов, и фрагменты пляжей северо-западных флангов этих выступов. Юго-восточнее устья р. Туапсе в пределах бунного комплекса располагается фрагмент галечного пляжа протяженностью 2.5 км, положение которого в последнее время не меняется (рис. 2).

Из этого следует, что выносы реки в пределах этого участка берега компенсируют только потери на истирание пляжного материала. Можно допустить, что незначительная часть наносов, не превышающая 1 тыс. м³, уходит за пределы рассматриваемого фрагмента берега во вдольбереговом потоке. Ежегодные потери на истирание наносов в пределах этого участка берега при среднем его значении равном 1.5 тыс. м³ на 1 км составят 3.75 тыс. м³. При принятом допущении о возможном обходе материалом бунного комплекса, современный сток пляжеобразующих наносов р. Туапсе составит около 5 тыс. м³ в год.

Аналогичным способом с учетом истираемости пляжного материала на северо-западных флангах современных аккумулятивных мысов были определены стоки рек Аше, Псезуапсе и Шахе (рис. 3), которые в настоящее время соответственно составили 9.6, 12.5 и 24.4 тыс. м³ в год. Полученные величины твердого стока близки к данным В.В. Ромашина [8] по измененному стоку этих рек, уменьшенному на коэффициент 1.7. Следует отметить, что уменьшение твердого сто-

ка, обусловленного выборкой наносов с русел, наблюдается в основном на относительно крупных водотоках и не затрагивает малые реки и ручьи. Данные по современному стоку пляжеобразующих наносов представлены в табл. 1 (столбец 5).

При отсутствии надежных данных по твердому стоку рек Черноморского побережья Краснодарского края и величине вдольбереговых потоков наносов при расчете баланса наносов на исследуемом участке берега возможна его оценка по литодинамическим признакам, характеризующим этот фрагмент берега.

Сравнение ширины пляжа от Туапсе до Адлера, установленной по обследованиям, выполненным в 2018 г., с предыдущими данными свидетельствует о возрастающей ее неравномерности вдоль берега, связанной с диспропорцией между участками берега с избыточно широкими пляжами и участками, где их ширина недостаточна. Это обусловлено усиливающимися негативными последствиями антропогенной нагрузки на береговую зону, проявляющимися в возведении берегозащитных комплексов без отсыпки пляжа полного профиля, строительстве длинных бун, перехватывающих вдольбереговую поток наносов, перед которыми формируются пляжи избыточной ширины, и ряда других. Так по северной грани бунной длиной 88 м, возведенной по правому берегу р. Дагомыс, сформировался пляж шириной до 83 м, за

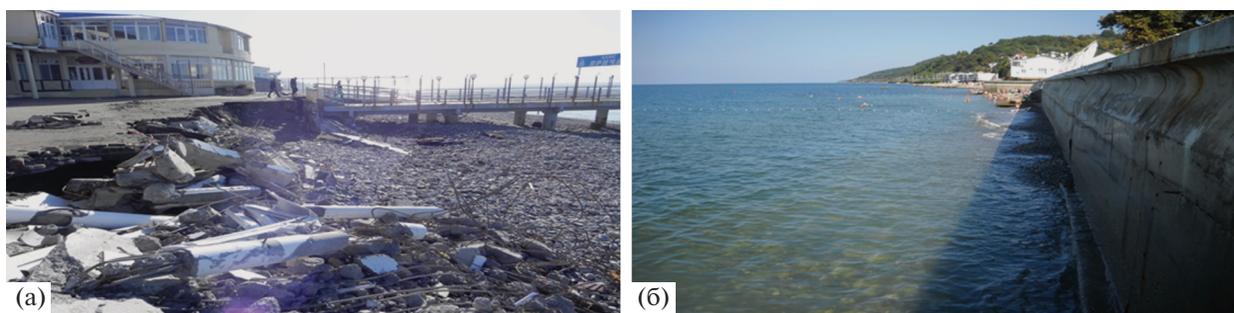


Рис. 4. Размыв пляжа в пос. Лоо (а) (2017 г.) и возведенная волноотбойная стена (б) (2019 г.).

которой после пляжного комплекса “Дагомыс” он исчезает, а волноотбойная стена защищена установленными перед ней бетонными массивами.

Широкий пляж в основном формируется в пределах бунных комплексов, возведенных вблизи устьев рек, за которыми ниже по ходу потока наносов развивается низовой размыв, приводящий к полному исчезновению волногасящего пляжа. Это характерно для устьев рек Туапсе, Аше, Псезуапсе, Шахе и ряда более мелких водотоков. Развитие таких процессов обусловлено недостаточными объемами или полным отсутствием во время строительства отсыпок пляжеобразующего материала в межбунные отсеки, которые не заполняются наносами, выносимыми реками, что приводит к резкому сокращению вдольберегового потока. При этом сами буны, в межбунные отсеки которых не отсыпан в полном объеме пляжеобразующий материал, не способны защитить береговой откос от воздействия волн. Они будут перехватывать вдольбереговой поток галечных наносов, формируемый выносами рек, что приведет к размыву оставшихся фрагментов галечных пляжей. Наибольшую угрозу это создает существованию трем крупным фрагментам сохранившихся естественных пляжей, расположенных на Лазаревском аккумулятивном выступе протяжением 4.3 км между устьем р. Лоо и мысом Уч-Дере, и пляжам Имеретинской низменности, протяжением 7.8 км, расположенным между устьями рек Мзымта и Псоу.

Буны, возведенные северо-западнее устья р. Лоо без отсыпки в межбунные отсеки волногасящих пляжей полного профиля, прервали, хотя и несколько уменьшенный из-за сокращения твердого стока рек, вдольбереговой поток галечных наносов, формируемый в основном выносами р. Шахе, впадающей в море в 14 км западнее. В пределах пос. Лоо во время прохождения в 2017 г. шторма западного направления был почти полностью размыв некогда существовавший широкий галечный пляж и разрушена набережная (рис. 4а). Дальнейшие волнения полностью размывли остатки пляжа, и для предохранения от раз-

рушения прилегающей территории была возведена подпорно-волноотбойная стена (рис. 4б). Однако при отсутствии перед ней пляжа или волногасящего сооружения, что запрещено нормативными документами [9], возведенная на рыхлых основаниях волноотбойная стена в ближайшее время может быть разрушена. Начавшийся размыв рассматриваемого фрагмента естественного галечного пляжа из-за перехвата вдольберегового потока наносов будет распространяться в юго-восточном направлении, что создаст угрозу нормальной эксплуатации проходящей в его тыльной части железной дороги и значительно уменьшит рекреационный потенциал пляжей.

Наибольшее влияние на вдольбереговое перемещение галечного материала оказывают ограждающие молы портов, размещенные юго-восточной устьев рек. Возведенные на южных флангах устьевых аккумулятивных выступов молы Сочинского порта, построенные в 1936 г., и Имеретинского порта в 2007 г., полностью прервали вдольбереговые потоки наносов. Проблемы с пляжами, расположенными южнее устья р. Сочи, из-за невозможности их пополнения выносами реки, проявляются в последние 70–80 лет и не решены полностью в настоящее время. Подобная проблема возникла и после возведения Имеретинского порта, приведшая к полному перехвату вдольберегового потока наносов, формируемого выносами р. Мзымта. Естественные галечные пляжи Имеретинской низменности быстрыми темпами начали размываться. В настоящее время пляж на протяжении 1 км от порта полностью размыв [7, 13]. От разрушения волнами набережная защищена наброской крупных камней (рис. 5) и, тем не менее, подвергается систематическому разрушению [6]. Этот участок берега полностью исключен из рекреационного использования. Без принятия срочных мер по отсыпкам пляжеобразующего материала размыв пляжа будет продолжаться.

Перехват вдольберегового потока наносов системой бун привел к размыву пляжей на северо-западном фланге Лазаревского аккумулятивного выступа (рис. 6). Берег превратился в нагромож-



Рис. 5. Защита набережной олимпийского комплекса в Адлере наброской крупного камня (а) и ее разрушение (б).

дение бетонных шпал и блоков, защищающих железнодорожное полотно от воздействия волн, но используемых рекреантами для отдыха. Практически полное отсутствие естественного вдольберегового потока наносов и отсыпок привозного пляжеобразующего материала скажется на продвижении размыва пляжа в сторону центра пос. Лазаревское, что сопряжено с утратой сохранившегося естественного галечного пляжа, возможным разрушением береговой инфраструктуры и существенным сокращением рекреационной зоны.

ВЫВОДЫ

Хозяйственная деятельность человека негативно отразилась на состоянии галечных пляжей Черноморского побережья Краснодарского края. Необходимость защиты железной дороги, протянувшейся вдоль всего берега от Туапсе до Адлера, и курортная значимость этого региона, предопределили проведение берегозащитных мероприятий на основе восстановления утраченных и создания искусственных галечных пляжей. Несмотря на значительные отсыпки привозного пляжеобразующего материала, основным источником наносов, пополняющих пляжи, является твердый сток многочисленных водотоков. При



Рис. 6. Состояние берега на северо-западном фланге Лазаревского аккумулятивного выступа.

литодинамических исследованиях, проводимых при разработке берегозащитных мероприятий, включающих создание волногасящих галечных пляжей полного профиля, до настоящего времени пользуются данными по среднегодовому стоку пляжеобразующих наносов крупностью более 2 мм, представленными в работах Г.Н. Хмаладзе [11], а позднее — В.В. Ромашина [8].

Выполненные авторами на основе балансовых расчетов исследования свидетельствуют:

- данные по величине стока пляжеобразующего материала для рек Черноморского побережья Краснодарского края у Г.Н. Хмаладзе завышены в 2 раза;

- величина стока пляжеобразующего материала у В.В. Ромашина завышена в 1.7 раза.

По объемам крупнообломочного материала, отложившегося в межбунных отсеках на участках берега вблизи устьев крупных рек, дается оценка величины современного стока рек между Туапсе и Адлером, сокращающегося в результате усиливающегося антропогенного вмешательства в береговые, а особенно в русловые процессы, связанные с канализацией русел и выборкой аллювиального материала.

Использование при балансовых расчетах данных, приведенных в указанных выше работах, завышает объем пляжеобразующего материала, поступающий из рек на берег, что негативно отражается на прогнозах состояния пляжной полосы между Туапсе и Адлером.

Сокращение реками твердого стока, перехват вдольберегового потока галечных наносов огражденными молами портов и возведенными пляжеудерживающими сооружениями являются причинами неравномерного распределения ширины галечного пляжа между Туапсе и Адлером и размыва последних фрагментов естественных пляжей. Это усугубляется порочной практикой проведения берегозащитных мероприятий, когда в межбунные отсеки возведенных бетонных или

каменноабросных бун отсыпается недостаточные объемы пляжеобразующего материала или же материал вообще не отсыпается в надежде их заполнения наносами выносимыми реками. Уменьшение поступления на берег пляжеобразующего материала из рек, объемы которого не в состоянии поддерживать пляжи в стабильном состоянии, приводит к усилению темпов деградации галечных пляжей на Черноморском побережье Краснодарского края.

Для восстановления утраченных галечных пляжей, выполняющих в рассматриваемом регионе как берегозащитные, так и рекреационные функции, необходимо полностью запретить выборку аллювиального материала с русел приморских рек, что увеличит объемы пляжеобразующего материала, поступающего на берег. Это будет способствовать хотя и медленному, но неуклонному увеличению ширины пляжей. Наиболее перспективным является восстановление утраченных галечных пляжей в результате отсыпки крупнообломочного пляжеобразующего материала, т.е. создание искусственных галечных пляжей.

При проведении берегозащитных мероприятий необходимо в межбунные отсеки отсыпать пляжный материал в объеме, предусмотренном проектом, а также заполнить крупнообломочными наносами существующие пустующие межбунные отсеки до полной пляжеудерживающей способности возведенных бун. Это позволит создать искусственные галечные пляжи на значительном протяжении берега. Необходимо предусматривать отсыпки наносов за построенными бунными комплексами и исключить их возведение вблизи устьев рек, что существенным образом уменьшит низовые размывы пляжей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гречищев Е.К., Жданов А.М., Сухиашивили Н.К., Филлин Л.Г.* Основные задачи инженерной защиты берегов от размыва и образование пляжей на побережье Черного моря // Инженерная защита берегов Черного моря и рациональное использование прибрежных территорий. Киев: Будівельник, 1968. С. 9–12.
2. *Гречищев Е.К., Шульгин Я.С.* Проблемы защиты берегов Черного моря. // Укрепление морских берегов. М.: Транспорт, 1972. С. 10–15.
3. *Джаошвили Ш.В.* Речные наносы и пляжеобразование на Черноморском побережье Грузии. Тбилиси: “Сабчота Сакартвело”, 1986. 156 с.
4. *Жданов А.М.* Истирание галечных наносов под действием волнения // Бюллетень Океанографической комиссии. 1958. №1. С. 81–88.
5. *Жданов А.М.* Об основных проблемах защиты берегов Черного моря от разрушительного воздействия волнения // Морские берегоукрепительные сооружения. Тр. ЦНИИС, Вып. 50. 1963. № 50. 76 с.
6. *Петров В.А., Ярославцев Н.А.* Берег Имеретинской низменности. Настоящее и будущее // Матер. XXVII междунар. береговой конф. “Арктические берега: путь к устойчивости”. Мурманск: МАГУ, 2018. С. 124–127.
7. *Петров В.А., Ярославцев Н.А.* Влияние порта “Сочи-Имеретинский” на береговые процессы (Черное море) // Геоэкология. 2019. № 5. С. 38–47.
8. *Ромашин В.В.* Морфодинамика речных русел Сочиного района Черноморского побережья Кавказа // Тр. ЦНИИС. Вып. 211. 2002. 167 с.
9. СП 277.1325800.2016 “Сооружения морские берегозащитные. Правила проектирования”. <http://docs.cntd.ru/document/456055940>.
10. *Федоровский Н.Н.* Особенности берегозащитных мероприятий на сочинском курорте // Инженерная защита берегов Черного моря и рациональное использование прибрежных территорий. Киев: Будівельник, 1968. С. 22–26.
11. *Хмаладзе Г.Н.* Выносы наносов реками Черноморского побережья Кавказа. Л.: Гидрометеиздат, 1978. 167 с.
12. *Шелушин Ю.А., Петров В.А.* Динамика пляжей участка Черноморского побережья России 1956–2018 гг. // Матер. Междунар. конф. “Закономерности формирования и воздействия морских, атмосферных опасных явлений и катастроф на прибрежную зону РФ в условиях глобальных климатических и промышленных вызовов (“опасные явления”). Ростов-на-Дону: ЮНЦ РАН, 2019. С. 217–221.
13. *Ярославцев Н.А., Сафьянов Г.А., Петров В.А.* Динамика пляжей морского края Имеретинской низменности в междуречье Мзымта-Псоу (Черное море) // Сложные системы. 2018. № 1 (26). С. 37–54.

RUNOFF OF CARRIED RIVER SEDIMENTS AT THE BLACK SEA COAST, KRASNODAR REGION

V. A. Petrov^{a,#} and N. A. Yaroslavtsev^a

^a TsNIIS Joint Stock Co. Branch, “Sea shores” Research Center,
ul. Yana Fabritsiusa, 1, Sochi, 354002 Russia

[#]E-mail: demmi8@mail.ru

Coastal protection measures carried out on the Black Sea coast of the Krasnodar Territory should be focused on the preservation of existing pebble beaches and the creation of wave-damping artificial beaches that meet recreational requirements. This fully applies to the pebble beaches located between Tuapse and Adler, experiencing huge anthropogenic load from the construction of recreational facilities and coastal protection struc-

tures that protect the railway from waves. When restoring lost beaches and creating new ones, solid river runoff must be taken into account, inaccurate data on which may negatively affect the recommended bank protection measures. Under natural conditions, before the construction of ports, coastal protection structures and sampling of alluvial sediments from rivers and beaches, the stable state of the beaches was ensured by the equality of the input and output components of the sediment balance in the coastal zone. In the inlet part, the main thing was the arrival of coarse-grained material on the coast, carried out by numerous streams. The expenditure component was determined by the abrasion of the beach material when moving under the influence of waves and, in part, by leaving the coastal section in the alongshore flow. The balance calculation permitted us to specify the runoff of the beach-forming material with a size >2 mm from the rivers of the Black Sea coast, the Krasnodar krai, as sited in the works by G.N. Khmaladze [11] and, partially, V.V. Romashin [8]. Our calculations revealed overestimated solid runoff 2 times, by G.N. Khmaladze and 1.7 times, by V.V. Romashin. Anthropogenic interference with natural channel processes, i.e., channelling river beds and alluvium excavation has reduced the natural volume of sediments carried by rivers. The actual current solid runoff can be estimated proceeding from the volume of material accumulated in the coastal zone near river mouths, including buna complexes, in the interbuna compartments of which no beach-forming material was poured. Buna complexes located downstream of river mouths in the direction of the sediment flow accumulate sediments carried by rivers, which leads to the emergence and advancement of downstream erosion. A significant reduction in the solid river runoff causes an uneven distribution of the beach width along the coast, which is also associated with the construction of transverse barriers of unjustified length.

Keywords: *sediment balance, groin, alongshore flow, abrasion of pebble sediments, beach, solid river runoff*

REFERENCES

1. Grechishchev, E.K., Zhdanov, A.M., Sukhiashvili, N.K., Filin, L.G. *Osnovnye zadachi inzhenernoi zashchity beregov ot razmyva i obrazovanie plyazhei na poberezh'e Chernogo morya* [The main tasks of the engineering protection of the coast from erosion and the formation of beaches on the Black Sea coast]. *Inzhenernaya zashchita beregov Chernogo morya i ratsional'noe ispol'zovanie pribrezhnykh territorii* [Engineering protection of the Black Sea coast and the rational use of coastal territories]. Kiev, Budivel'nik Publ., 1968. P. 9–12. (in Russian)
2. Grechishchev, E.K., Shul'gin, Ya.S. *Problemy zashchity beregov Chernogo morya* [The problems of protecting the Black Sea shores]. *Ukrepnenie morskikh beregov* [Reinforcing the sea coasts]. Moscow, Transport Publ., 1972. P. 10–15. (in Russian)
3. Dzhaoshvili, Sh.V. *Rechnye nanosy i plyazheobrazovanie na Chernomorskom poberezh'e Gruzii* [River sediments and beach formation on the Black Sea coast of Georgia]. Tbilisi, SabchotaSakartvelo Publ., 1986. 156 p. (in Russian)
4. Zhdanov, A.M. *Istiranie galechnykh nanosov pod deistviem volneniya* [Abrasion of pebble deposits under the influence of waves]. *Bulleten' okeanograficheskoi komissii*, 1958. № 1. P. 81–88. (in Russian)
5. Zhdanov, A.M. *Ob osnovnykh problemakh zashchity beregov Chernogo morya ot razrushitel'nogo vozdeistviya volneniya* [On the main problems of protecting the shores of the Black Sea from the destructive effects of waves]. *Morskie beregoukrepitel'nye sooruzheniya* [Marine shore protection structures]. Transactions of TsNIIS. № 50, 1963, 76 p. (in Russian)
6. Petrov, V.A., Yaroslavtsev, N.A. *Bereg Imeretinskoi nizmennosti. Nastoyashchee i budushchee* [Shore of the Imereti Lowland. Present and future]. Proc. of the XXVII International Coastal Conference “Arctic Shores: the Path to Sustainability.” Murmansk, September 24–29, 2018, Murmansk, MAGU, 2018. P. 124–127. (in Russian)
7. Petrov, V.A., Yaroslavtsev, N.A. *Vliyanie porta “Sochi-Imeretinskii” na beregovye protsessy (Chernoje more)* [Impact of the port “Sochi-Imeretinsky” on coastal processes (the Black Sea)]. *Geoekologiya*, 2019. № 5. P. 38–47. (in Russian)
8. Romashin, V.V. *Morfodinamika rechnykh rusel Sochinskogo raiona Chernomorskogo poberezh'ya Kavkaza* [Morphodynamics of river channels in the Sochi region of the Black Sea coast of the Caucasus]. Transactions of TsNIIS. № 211, 2002, 167 p. (in Russian)
9. SP 277.1325800.2016 *Sooruzheniya morskije beregozashchitnye. Pravila proektirovaniya* [Marine coastal protection structures. Design rules]. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/456055940> (in Russian)
10. Fedorovskii, N.N. *Osobennosti beregozashchitnykh meropriyatii na sochinskom kurorte* [Features of coastal protection measures at the Sochi resort]. *Inzhenernaya zashchita beregov Chernogo morya i ratsional'noe ispol'zovanie pribrezhnykh territorii* [Engineering protection of the Black Sea coast and the rational use of coastal territories]. Kiev, Budivel'nik Publ., 1968. P. 22–26. (in Russian)
11. Khmaladze, G.N. *Vynosy nanosov rekami Chernomorskogo poberezh'ya Kavkaza* [Carrying out sediments by the rivers of the Black Sea coast the Caucasus]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1978, 167 p. (in Russian)
12. Shelushinin, Yu.A., Petrov, V.A. *Dinamika plyazhei uchastka Chernomorskogo poberezh'ya Rossii 1956–2018 gg.* [The dynamics of the beaches of the section of the Black Sea coast of Russia 1956–2018]. Proc. International Conference “Patterns of the formation and impact of marine, atmospheric hazards and disasters on the coastal zone of the Russian Federation in the context of global climatic and industrial challenges (“hazardous phenomena”). Rostov-on-Don, YuNTS RAN, 2019. P. 217–221. (in Russian)
13. Yaroslavtsev, N.A., Saf'yanov, G.A., Petrov, V.A. *Dinamika plyazhei morskogo kraya Imeretinskoi nizmennosti* [The dynamics of the beaches at the sea edge of the Imereti lowland in the Mzymta-Psou interfluvium (Black Sea)]. *Slozhnye sistemy*, 2018. № 1 (26). P. 37–52. (in Russian)

ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОПРИРОДНЫЕ
ПРОЦЕССЫ

УДК 551.468.6

ИЗОТОПНЫЕ, ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ И ГИДРОХИМИЧЕСКИЕ
ИНДИКАТОРЫ РАЗГРУЗКИ ГРУНТОВЫХ ВОД В ЭСТУАРИИ
р. РАЗДОЛЬНАЯ (АМУРСКИЙ ЗАЛИВ, ЯПОНСКОЕ МОРЕ)
В ПЕРИОД ЛЕДОСТАВА

© 2021 г. П. Ю. Семкин^{1,*}, П. Я. Тищенко¹, А. Н. Чаркин¹, Г. Ю. Павлова¹, Е. В. Анисимова¹,
Ю. А. Барабанщиков¹, Т. А. Михайлик^{1,2}, Е. Ю. Тибенко¹, П. П. Тищенко¹, М. Г. Швецова¹,
Е. М. Шкирникова¹

¹ Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН,
ул. Балтийская, 43, Владивосток, 690041 Россия

² Санкт-Петербургский филиал ФГБНУ «ВНИРО» («ГосНИОРХ» им. Л. С. Берга»),
ул. Набережная Макарова, 26, Санкт-Петербург, 199053 Россия

*E-mail: pahno@list.ru

Поступила в редакцию 21.01.2021 г.

После доработки 10.03.2021 г.

Принята к публикации 15.03.2021 г.

В феврале 2020 г. проведены комплексные исследования геохимических, гидрологических и гидрохимических характеристик эстуария трансграничной (Китай–Россия) р. Раздольная. На основании данных по распределению радионуклидов изоб. ^{224}Ra обнаружена разгрузка грунтовых вод на расстоянии 22 км от устьевого бара реки. Изотопный состав ($\delta^{18}\text{O}$ и δD) в зоне разгрузки определяется соотношением доли морских и речных вод. Доминирование прямых течений со скоростью до 15 см/с, повышенная активность избыточного изотопа ^{224}Ra от 11.1 ± 0.1 до 2.2 ± 0.05 Бк/м³ и положительная температура воды до 1.1°C в придонном слое эстуария указывают на распространение осолоненных вод из района их разгрузки в приемный бассейн. По данным автономных измерений, полученных в 2014 г., температура в районе влияния грунтовых вод на протяжении периода ледостава возрастала до 2.5°C, а толщина льда при этом снижалась вдоль зоны смешения до 20 см (толщина льда за пределами зоны смешения составляла 90 см). Разгрузка грунтовых вод сопровождается понижением насыщения вод O_2 и откликом в соотношениях главных биогенных веществ. В качестве основной причины разгрузки грунтовых вод рассматривается интрузия морских вод в верхний водоносный горизонт и просачивание этих вод через осадок в створе с наибольшей глубиной.

Ключевые слова: *изотопы ^{224}Ra , $\delta^{18}\text{O}$ и δD , разгрузка грунтовых вод, эстуарий, зона смешения, растворенный кислород, биогенные вещества, макрокомпонентный состав*

DOI: 10.31857/S0869780921030097

ВВЕДЕНИЕ

Разгрузка субмаринных грунтовых вод (СГВ) в прибрежно-морских акваториях – это процесс, существующий на побережьях всего Мирового океана [32, 42]. Этот процесс подразумевает поток подземных вод с суши, которые могут быть смешанны с морской водой, проникающей в прибрежные водоносные горизонты [34]. Проникновение морских вод в прибрежные водоносные горизонты в той или иной степени также происходит повсеместно [38], и приводит к осолонению речных долин [29]. Баланс между проникновением морских вод и разгрузкой СГВ формируется под влиянием интенсивности загрузки водоносных горизонтов метеорными водами,

приливами в приемном бассейне, различием плотности вод суши и моря [34], а также наличием искусственных гидротехнических сооружений [41]. Установлено, что интенсивное проникновение морских вод в прибрежные водоносные горизонты наблюдается в периоды засухи [36], а максимальная разгрузка СГВ в приемные бассейны происходит после дождей [44]. Отслеживание и измерение величины потока грунтового водообмена и связанных с ним потоков веществ являются сложной задачей. В связи с развитием научного интереса к данным процессам в иностранной литературе сформировался относительно новый термин – “subterranean estuary” (подземное устье реки) [33]. Как и в случае с поверхностными

устьями, через подземные устья в поверхностные прибрежные воды поставляются значительные потоки химических веществ, которые сопоставимы с поверхностным стоком в приемные бассейны [34, 44] и имеют значимый эффект в формировании таких экологических негативных явлений как “красные” приливы [30] и гипоксия [26].

Основной инструмент для поиска источников и количественной оценки потоков СГВ в прибрежные районы — изотопы радия (^{226}Ra , ^{228}Ra , ^{223}Ra и ^{224}Ra) [23]. В качестве прямого метода для изучения генезиса вод в гидрогеологии и в гидрологии поверхностных вод используются стабильные изотопы $\delta^{18}\text{O}$ и δD [18]. Самый простой способ поиска СГВ в прибрежных акваториях — измерение солености. Но, как правило, этот способ не информативен, поскольку СГВ могут быть представлены смесью грунтовых вод суши и рециркулируемой морской воды, проникающей в прибрежные водоносные горизонты. Рециркуляция морских вод и их последующая разгрузка, а также потоки термальных вод и пресных грунтовых вод суши часто сопровождается аномалиями температуры в приемных бассейнах [21]. Поэтому при изучении разгрузки СГВ важно изучение температурного режима акватории. Химический состав грунтовых вод, как правило, значительно отличается от состава поверхностных вод [31], поэтому разгрузка СГВ может быть идентифицирована с помощью гидрохимических характеристик.

Водообмен эстуариев Японского моря, как параметр экосистемы, широко изучался но без учета потока СГВ на побережьях Японии [43] и Российской Федерации [1, 11, 15–17, 39], в том числе в период ледостава [4, 12]. Зима для рек Японии, впадающих в Японское море, это сезон половодий [25], а для покрытых льдом рек северо-западной части Японского моря — период устойчивой межени [7]. Ледяной покров исключает турбулентность, связанную с ветровым воздействием, и именно в этих условиях следует ожидать наибольшего проявления СГВ.

Результаты гидрологических исследований в эстуарии р. Раздольной показали существование обмена грунтовых вод с поверхностными речными водами в районе верхней границы зоны смешения (ЗС) [13].

Цель данной статьи — представить общую характеристику влияния разгрузки СГВ на комплекс гидролого-гидрохимических параметров в эстуарии р. Раздольной в период ледостава.

ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Эстуарий трансграничной р. Раздольной (Китай–Приморский край РФ), согласно имеющимся публикациям [4, 15, 16] и уточненной устьевой

терминологии [9], простирается более чем на 45 км (рис. 1). Из первых исследований [2] следует, что эстуарий относится к микро приливному типу с сильной стратификацией вод (величина сизигийных приливов от 15 до 20 см). Положение ЗС в эстуарии определяется объемом речного стока [3]. Средний расход реки за многолетний период на посту в с. Тереховка — $70.6 \text{ м}^3/\text{с}$ [7]. В водном режиме р. Раздольной выделяется устойчивая зимняя межень со среднемесячным расходом реки в январе и феврале — $2\text{--}3 \text{ м}^3/\text{с}$ [7], весеннее половодье в мае, а также дождевые паводки в летние и осенние месяцы. Максимумы весенних половодий приблизительно в 10 раз превосходят средний годовой расход реки и могут превышать $800 \text{ м}^3/\text{с}$. Абсолютные максимумы расхода в период паводков летом и осенью в отдельные годы превышают $3000 \text{ м}^3/\text{с}$ (<http://gmvo.skniivh.ru/>). В период ледостава — с конца ноября по начало апреля — в эстуарии р. Раздольной устанавливается режим проникновения клина осолоненных вод на расстояние до 28 км от устьевого бара реки, соленость вод приемного бассейна при этом превышает 34‰ [4].

С 10 по 13 февраля 2020 г. были отобраны пробы воды в придонном (0.5 м от дна) и поверхностном (0.5 м от нижней границы льда) слоях воды эстуария (см. рис. 1). В пробах воды с использованием системы задержанных совпадений (Radium Delayed Coincidence Counter (RaDeCC)) [35] проведены измерения растворенных в воде изотопов ^{224}Ra (период полураспада 3.66 сут) и ^{228}Th (период полураспада 1.9 года), на основе чего рассчитывалась активность избыточных изотопов ^{224}Ra (изб. ^{224}Ra) и погрешность определения, согласно методике, изложенной ранее [19]. Стабильные изотопы воды — $\delta^{18}\text{O}$ и δD , анализировали на лазерном анализаторе Picarro L2130-i (Picarro Inc., США) с использованием стандарта VSMOW-2. Воспроизводимость метода равна 0.1‰ для $\delta^{18}\text{O}$ и 0.5‰ для δD . Общий фосфор и азот определяли на автоматическом анализаторе Skalar San++ (Skalar, Netherlands). Биогенные вещества в неорганической форме определяли по стандартной методике с погрешностью 2% [6]. Соленость измеряли на солемере Guildline Autosal 8400B (Guildline Instruments, США) с точностью 0.002‰ . Щелочность анализировали прямым титрованием соляной кислотой в открытой ячейке с погрешностью $\pm 0.003 \text{ ммоль/кг}$.

Пробы воды для определения концентрации макрокомпонентов (Cl^- , SO_4^{2-} , Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) были отобраны отдельно на выборочных станциях и измерены на хроматографе LC-20A (Shimadzu, Япония). В качестве концентрации гидрокарбонатного иона (HCO_3^-) принималась величина щелочности. Суммарная аналитическая погрешность определения главных ионов была оценена с

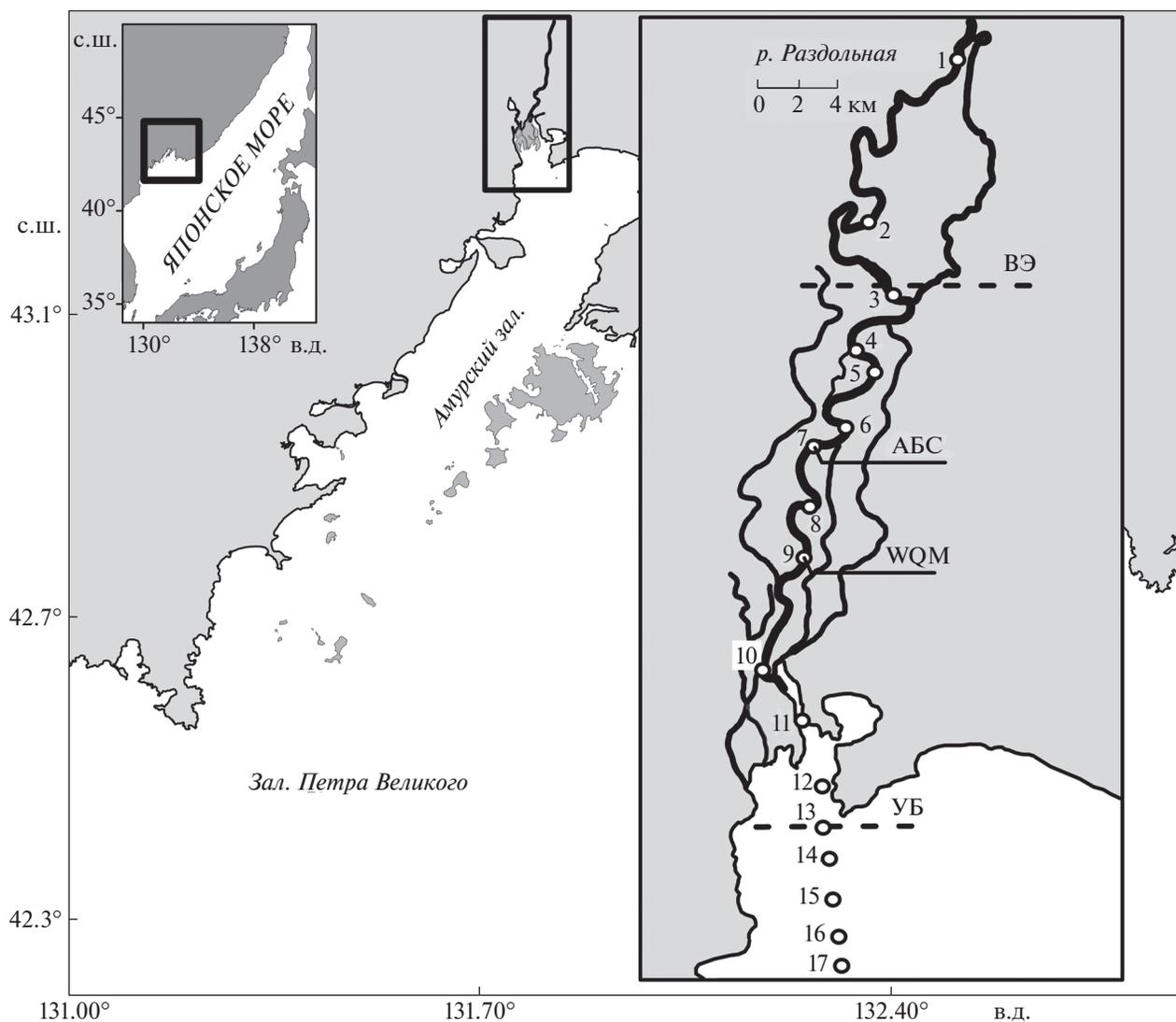


Рис. 1. Схема расположения станций отбора проб в эстуарии в феврале 2020 г. ВЭ – вершина эстуария, УБ – устьевой бар, АБС – автономная буйковая станция с измерителями течений, WQM (Water Quality Monitor) – донная автономная станция, установленная с декабря 2013 г. по март 2014 г.

помощью величины нормализованного зарядного баланса ионов NICB (normalized inorganic charge balance): $NICB(\%) = (TZ^+ - TZ^-) / TZ^+ \times 100$, где $TZ^+ [Na^+] + [K^+] + 2[Ca^{2+}] + 2[Mg^{2+}]$ и $TZ^- = 2[SO_4^{2-}] + [Cl^-] + [HCO_3^-]$. Здесь в скобках концентрации макрокомпонентов в размерности ммоль/кг. Величины NICB для всех исследуемых проб не превышают 2.7%.

Для получения профилей температуры, солености, мутности, освещенности и кислорода на каждой станции параллельно с отбором проб воды использовали профилограф SBE 19 plus (Seabird Electronics, USA), снабженный дополнительным оптическим датчиком кислорода ARO2-Infinity (JFE Advantech Co., Ltd., Japan) с точностью

2% в диапазоне 0–200% насыщения вод кислородом.

С 22 по 23 февраля 2020 г., на протяжении суток, в районе предполагаемой разгрузки СГВ измеряли течение в поверхностном (0.5 м от нижней границы льда) и в придонном (1 м от дна) слоях воды (см. рис. 1). Для этого применялись два электромагнитных измерителя течений (INFINITY JFE Advantech Co., Ltd. Japan) в составе заякоренной автономной буйковой станции (АБС). Параллельно, с периодичностью 1 час, наблюдали уровень воды (льда) с использованием заякоренной рейки.

В статье приведены также данные долгопериодной изменчивости температуры придонного слоя воды на глубине 7 м в районе ст. 9 (см. рис. 1)

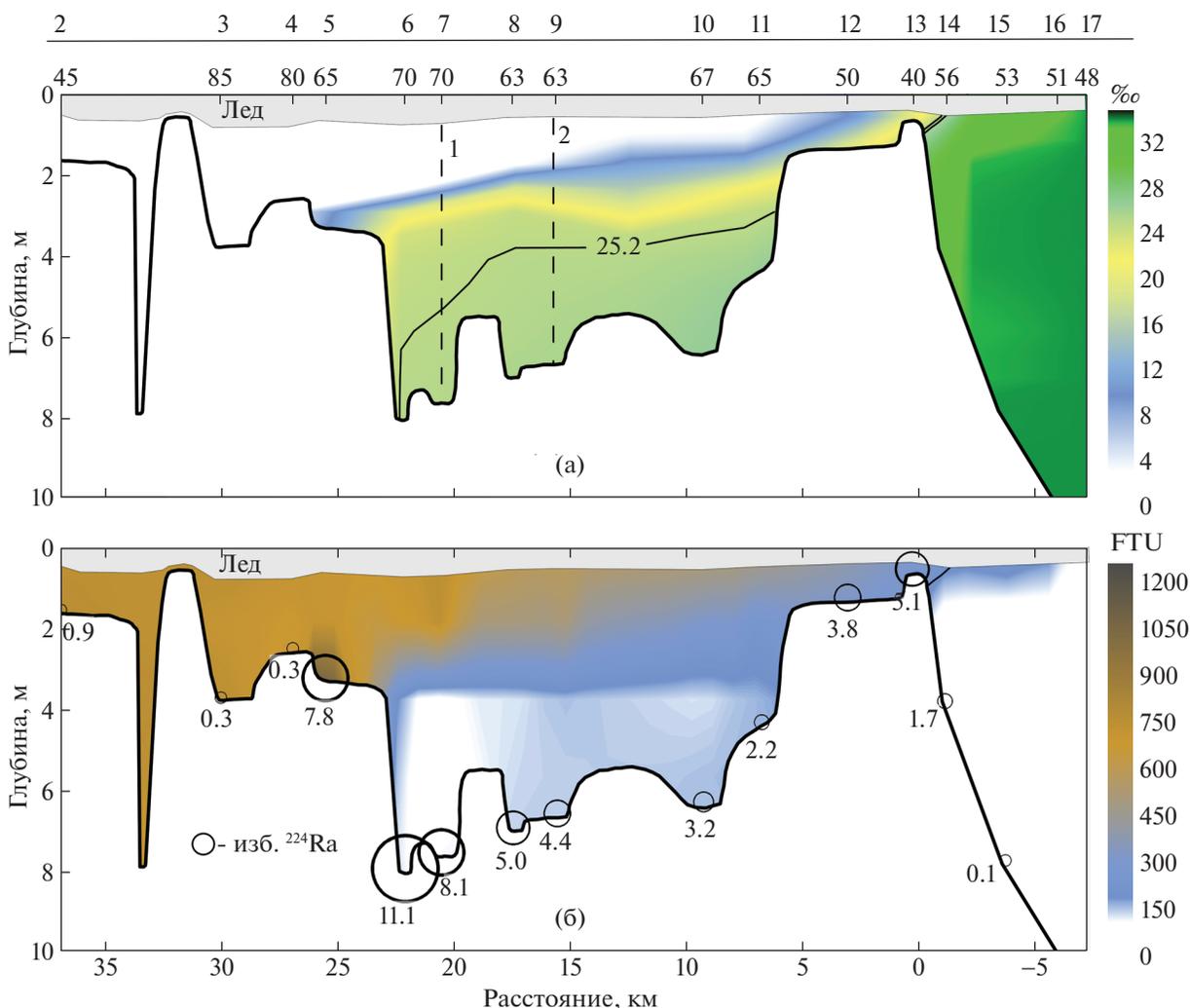


Рис. 2. Соленость воды, (‰) – (а), мутность воды (FTU-formazin turbidity unit) – (б); кружок – активность изотопов изб. ^{224}Ra (Бк/м³) в продольном профиле эстуария р. Раздольная 10–13.02.2020 г. Расстояние отсчитывается от устьевого бара реки. Пунктирные линии 1 и 2 на рис. (а) соответственно – район суточных наблюдений за уровнем и течением 22–23.02.2020 г. и район долгопериодной экспозиции станции WQM с декабря 2013 г. по март 2014 г.

за 2014 г. Эти данные получены с помощью автономной донной станции Water Quality Monitor (WQM) (Wet-Labs, USA).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДНИЕ

Изотопные характеристики

Структура ЗС, активность изб. ^{224}Ra и величина мутности вдоль профиля наибольших глубин в эстуарии р. Раздольной представлены на рис. 2. Наибольшая активность изб. ^{224}Ra , равная 11.1 ± 0.1 Бк/м³, была зафиксирована в придонных водах над депрессией рельефа эстуария на ст. 6 (см. рис. 1), на удалении 22 км от устьевого бара реки (см. рис. 2б). От депрессии рельефа до мелководного лимана активность изб. ^{224}Ra снижалась практически линейно, а соленость в придонном

слое воды была около 25.2‰. Также были отмечены два района с повышенной активностью изб. ^{224}Ra в придонном слое на верхней и нижней границах ЗС: 7.8 ± 0.02 Бк/м³ при солености 3.8‰ на ст. 5 и 5.1 ± 0.07 Бк/м³ при солености 16.6‰ на ст. 13. Минимальная активность изб. ^{224}Ra составляла менее 1 Бк/м³ и наблюдалась в речных и морских водах за пределами ЗС. При этом мутность вод с максимальной активностью изб. ^{224}Ra в плесе на ст. 6 была минимальной, на уровне величины в морской воде за пределами ЗС. Тогда как в водах с повышенной активностью изб. ^{224}Ra на ст. 5 и ст. 13 обнаружены максимальные величины мутности (см. рис. 2б).

Отмеченные закономерности указывают на то, что повышенная активность изб. ^{224}Ra , приуро-

ченая к мелководьям на границах ЗС (ст. 5, 13), вероятнее всего, связана с поступлением изотопов радия из взвешенных глинистых частиц, содержащих изотопы тория и являющихся постоянными источниками короткоживущих дочерних изотопов радия. Такие аномалии характерны для речных плюмов с высокой концентрацией осадочного материала [19]. Максимальная величина активности изб. ^{224}Ra при минимальной мутности в плесе на ст. 6 указывает на наличие разгрузки СГВ в данном районе. Существование повышенного фона активности радионуклидов ^{224}Ra в придонном слое воды при неизменной солености на протяжении 15 км от источника СГВ (ст. 6 – 11.1 ± 0.1 Бк/м³) до мелководного лимана (ст. 11 – 2.2 ± 0.05 Бк/м³), указывает на распространение этих вод в направлении моря от района их разгрузки (см. рис. 2).

В качестве основного источника СГВ в вершине эстуария мы рассматриваем морские воды, проникающие в прибрежный водоносный горизонт. Второй возможный источник грунтовых вод в придонном слое эстуария – глубинные водоносные горизонты в районе устьевой области поймы р. Раздольная. Но эти воды обладают более легким составом $\delta^{18}\text{O}$ и δD , чем воды верхнего водоносного горизонта и речные воды [20], поэтому их влияние в данном случае полностью исключается. Из рис. 3 видно, что в эстуарии состав стабильных изотопов определяется соотношением речной и морской воды.

Температура вод

Несмотря на льдообразование, в районе с максимальной активностью изб. ^{224}Ra (ст. 6) наблюдалась повышенная температура придонного слоя воды – более 1.1°C (рис. 4). Температура грунтовых вод, измеренная нами в трех опорных скважинах на границе поймы реки, составляла около 4°C . Повышенная температура на протяжении ЗС сопровождалась равномерным снижением толщины льда: от 85 см непосредственно перед ЗС до 40 см в районе устьевого бара реки, что также связано с влиянием рельефа дна (см. рис. 2). В то время как с морской стороны от устьевого бара температура воды была отрицательной (см. рис. 4), а толщина льда достигала 56 см. В феврале 2018 г. отмечалось снижение толщины льда до 20 см в зоне влияния разгрузки СГВ, тогда как за пределами ЗС толщина льда достигала 90 см [13].

Судя по имеющимся за 2014 г. данным долгосрочных измерений (рис. 5), разгрузка относительно теплых СГВ сопровождается повышением температуры воды в ЗС с января по март. Экстремумы температуры придонного слоя воды, имеющие периодичность около 2 недель, совпадали с

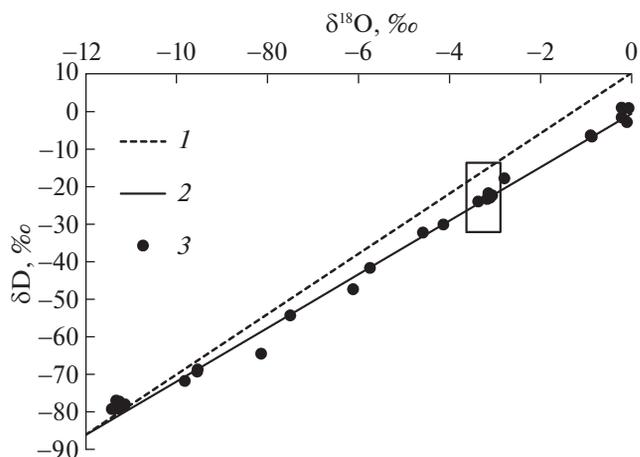


Рис. 3. Распределение изотопного состава воды $\delta^{18}\text{O}$ и δD относительно глобальной линии метеорных вод (1) [24] и локальной линии соотношения изотопов (2) [17]; 3 – воды эстуария р. Раздольная. Выделенная область на графике соответствует придонным водам в районе разгрузки СГВ (ст. 6, 7).

двухнедельным циклом приливов, согласно которому в указанные на рис. 5 даты наблюдались неправильные суточные приливы (<http://esimo.oceanography.ru/tides/>). В то время как понижение температуры в диапазонах между этими датами приходилось на циклы полусуточных приливов. Данная закономерность может быть связана с разницей в продолжительности действия “приливной накачки” [34], т.е. разницей в продолжительности гидравлического напора в водоносном горизонте при суточных и полусуточных приливах.

Динамика вод зоны смешения

В период наблюдений в феврале 2020 г. величина прилива в створе постановки АБС составляла 10 см (рис. 6), а в зал. Петра Великого (по данным портала ЕСИМО) – 18 см (<http://esimo.oceanography.ru/tides/>). Коэффициент прилива $K_{\text{пр}}$ для створа АБС составлял 0.55 ($K_{\text{пр}} = V_{\text{т}}/V_{\text{м}}$, где $V_{\text{т}}$ – величина прилива в данной точке, $V_{\text{м}}$ – величина прилива в море). Таким образом, приливная волна распространялась до района АБС с уменьшением амплитуды приблизительно на 1/2. При этом в поверхностном слое воды наблюдалась регулярная смена направления течения в зависимости от фаз приливов (см. рис. 6). В период приливной фазы течение в поверхностном слое воды со скоростью до 15 см/с было обратным (в сторону реки), а в отлив, в малые воды и в начальный период прилива течение сменялось на прямое (в сторону моря) со скоростью до 20 см/с.

Течение у дна в отлив и в малые воды было слабым и знакопеременным (до 5 см/с). Относитель-

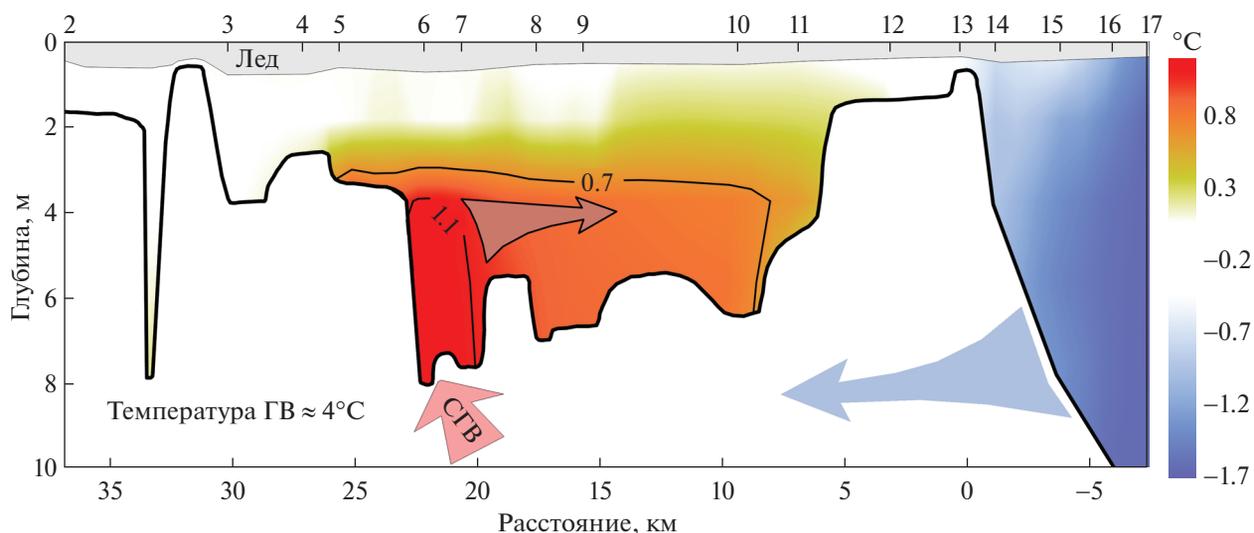


Рис. 4. Температура ($^{\circ}\text{C}$) воды в продольном профиле эстуария р. Раздольная в феврале 2020 г. Стрелками обозначен поток морских грунтовых вод, район разгрузки СГВ и их распространение по эстуарию, полученные на основании активности радионуклида ^{224}Ra и стабильных изотопов воды $\delta^{18}\text{O}$ и δD . На вставке указана температура грунтовых вод (ГВ) в створе разгрузки СГВ. Расстояние отсчитывается от устьевых бара реки.

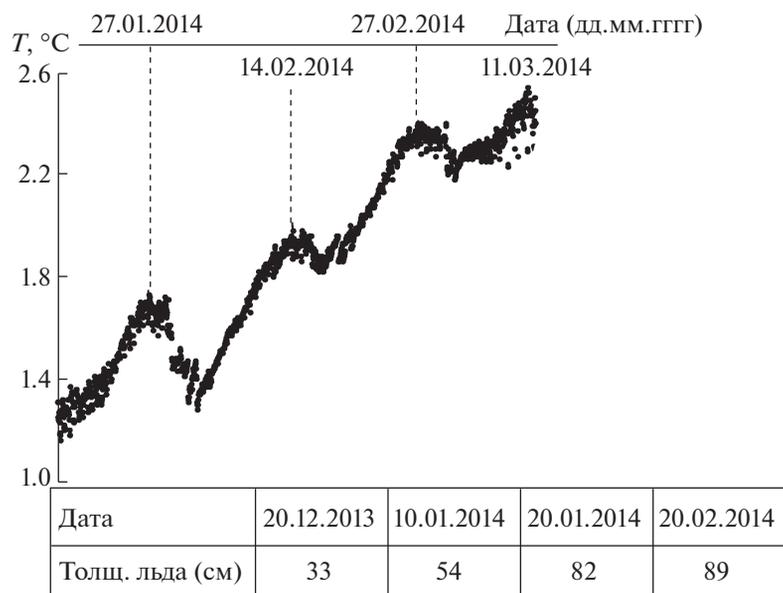


Рис. 5. Температура воды в придонном слое эстуария по данным WQM (15 км от устьевых бара реки) и толщина льда в нижнем течении р. Раздольная (36 км от устьевых бара реки) с декабря 2013 г. по март 2014 г.

но устойчивое прямое течение у дна наблюдалось в прилив и в полные воды в двух случаях (см. рис. 6). То есть в то время, когда течение в поверхностном слое было обратным за счет возрастающего уровня в приемном бассейне, у дна в районе разгрузки СГВ поток осолоненных вод распространялся в направлении моря. Скорость прямого течения в придонном горизонте существенно возрастала (приблизительно до 15 см/с) после моментов полных вод. Суммарный вектор прямых

течений в придонном слое осолоненных вод превышал за сутки в три раза суммарный вектор обратных течений, что согласуется с данными по радионуклидам изб. ^{224}Ra , указывающим на распространение осолоненных вод в направлении моря (см. рис 26). При этом наши данные не исключают существование классической двухслойной циркуляции в эстуарии р. Раздольная, как это отмечается в высоко стратифицированных эстуариях [8, 14], когда поток морских вод преимуще-

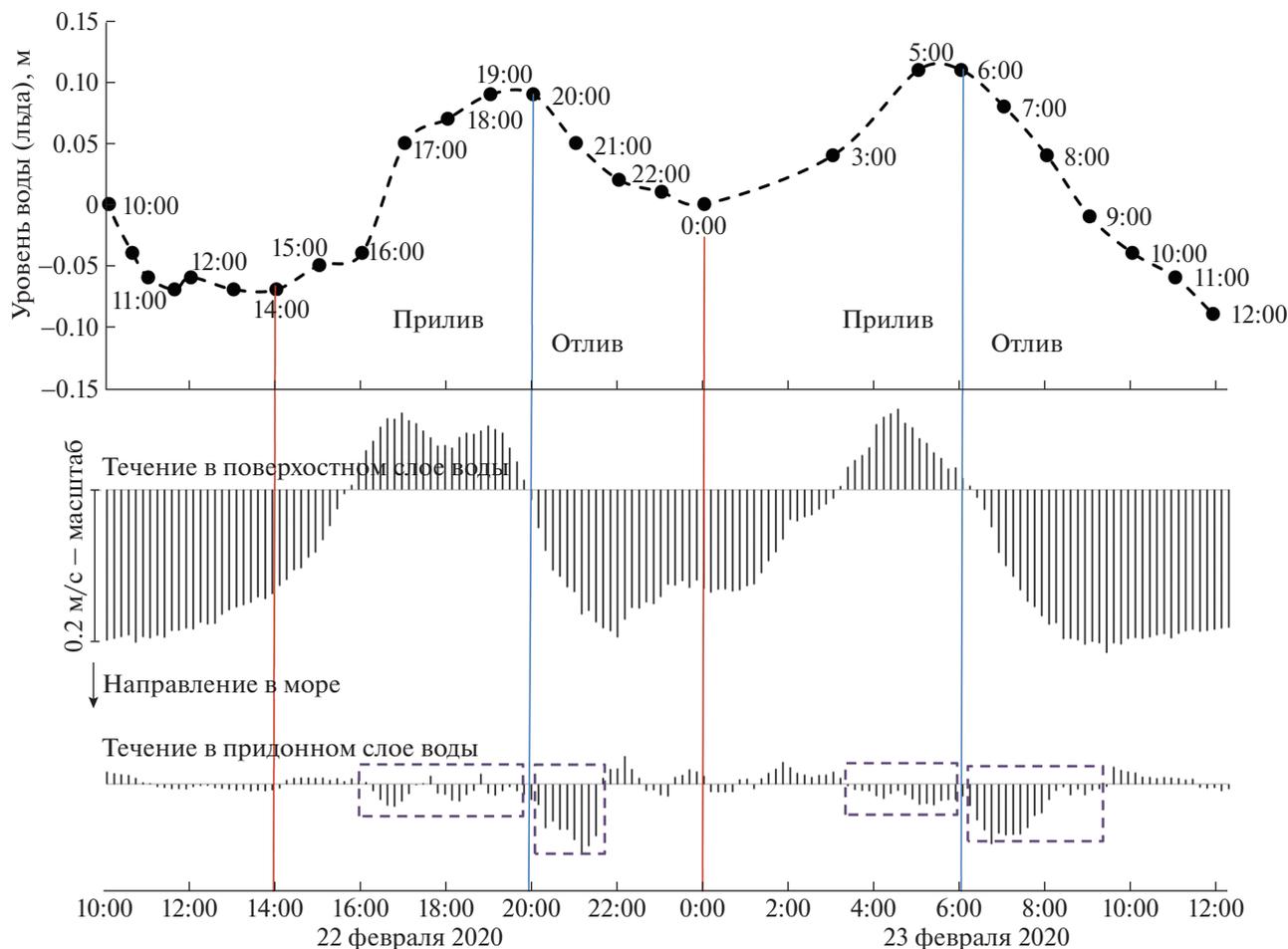


Рис. 6. Уровень воды (льда), величина и направление течения, измеренные с дискретностью 10 мин с использованием АБС на расстоянии 20 км от устьевых бара реки (ст. 7). Пунктиром выделены области с векторами, указывающими направление и скорость прямого течения (в направлении моря) в придонном слое воды.

ственно направлен в реку за счет плотностной и компенсационной (эффект вовлечения) составляющих. В эстуарии р. Раздольная поток осолоненных вод ориентирован в основном в море за счет разгрузки СГВ, но в периоды наибольшей скорости прямого течения в поверхностном слое, наличие слабого обратного течения в придонном слое воды все же имело место (см. рис. 6).

Растворенный кислород

Разгрузка бескислородных СГВ, имея косвенное влияние на кислородный режим акваторий, путем поставки питательных и органических веществ также может вносить прямой вклад в формирование кислородного режима вод, способствуя, в том числе формированию гипоксии [26]. Не исключая того, что определяющим фактором кислородного режима для эстуария р. Раздольная зимой является баланс фотосинтез/деструкция органического вещества [4], результаты, пред-

ставленные в данной статье, согласуются с выводом, сделанным в работе [26]. Минимальное насыщение морской воды кислородом 67% и 35% соответствовало водам с максимальной активностью изотопов изб. ^{224}Ra в районе разгрузки СГВ (ст. 6, 7) и верхней границы ЗС (ст. 5). Возможно, наименьшее насыщение вод кислородом в районе на ст. 5 объясняется совместным влиянием деструкции ОВ и разгрузки бескислородных грунтовых вод верхнего водоносного горизонта.

Фотический слой, судя по данным зонда, в районах разгрузки СГВ и верхней границы ЗС был распространен до дна (табл. 1), из-за малой мутности в большей части водной колонки (см. рис. 3б) и отсутствия снежного покрова на льду. Поэтому в придонных водах следует ожидать доминирование фотосинтеза над деструкцией органического вещества и пересыщение воды кислородом, как это наблюдалось при солёности более 10‰ на большей части акватории (рис. 7а). Недосыщение вод кислородом в пределах фотического

Таблица 1. PAR (photosynthetically active radiation) – фотосинтетически активная радиация (мкмоль квантов/(м² с)⁻¹) и освещенность придонного слоя воды (PAR %), выраженная в процентном соотношении от освещенности поверхностного слоя воды (на нижней границе льда)

№ ст.	PAR	PAR %
1 _д	64.2	–
2 _д	11.9	–
3 _п	48.8	–
3 _д	4.2	8.5
4 _п	140.1	–
4 _д	42.5	30.3
5 _п	79.7	–
5 _д	7.4	9.3
6 _п	66.9	–
6 _д	6.2	9.3
7 _п	157.8	–
7 _д	10.7	6.8
8 _п	71.6	–
8 _д	4.1	5.7
9 _п	33.5	–
9 _д	1.7	5.2
10 _п	73.8	–
10 _д	7.4	10.0
11 _п	143.9	–
11 _д	26.6	18.5
12 _д	85.4	–
13 _д	735.2	–
14 _п	63.4	–
14 _д	6.2	9.8
15 _п	147.9	–
15 _д	18.8	12.7
16 _п	149.6	–
16 _д	8.3	5.5
17 _п	104.3	–
17 _д	13.3	12.7

Примечание: индексами “п” и “д” обозначены, соответственно, строки данных для поверхностных и придонных слоев воды.

слоя может означать, что поток СГВ это важный фактор в формировании кислородного режима придонных вод эстуария р. Раздольная зимой.

Биогенные вещества

Определяющим процессом добавления/изъятия в среду/из среды основных биогенных ве-

ществ (неорганических форм азота (DIN), фосфора (DIP), силикатов (DSi)) для эстуариев и в том числе эстуария р. Раздольная [4] также, как и для режима кислорода, является продукция/деструкция органического вещества. На фоне относительно высоких концентраций биогенных веществ в речной воде разгрузка СГВ не привела к заметным их искажениям в придонном слое ЗС (см. табл. 2). Не отрицая того, что химический состав грунтовых вод при просачивании через осадок может существенно изменяться [5, 10] в соотношениях главных биогенных веществ DIN/DIP и DSi/DIN нами отмечен отклик на разгрузку СГВ (рис. 8). Повышение величины DIN/DIP распространенное явление для районов разгрузки СГВ [30]. Однако в нашем случае это повышение связано с влиянием инфильтрации морских вод, обедненных фосфатами, в том числе из-за сорбции [40], в то время как в случае влияния пресных вод со стороны густонаселенных районов на побережье р. Раздольная следует ожидать существенного повышения DIP.

Концентрация DSi в речных водах непосредственно перед ЗС на станциях 2–4 (см. табл. 2) была существенно выше, чем в реке на ст. 1. При приблизительно равной или меньшей концентрации неорганических форм азота в речных и грунтовых водах, пониженная концентрация DSi в грунтовых водах приводит к понижению величины DSi/DIN в зоне разгрузки СГВ. В данном случае, причина понижения DSi/DIN неоднозначна из-за различий в реакциях окисления органического вещества, содержащегося в этих водах. При исчерпании O₂ пути окисления органического вещества обычно идут согласно реакциям: денитрификация, восстановление оксидов железа (Fe) и марганца (Mn), восстановление сульфатов или метаногенез [37]. При наличии осолонения за счет вторжения морских вод в водоносный горизонт деструкция органического вещества происходит по пути восстановления сульфатов, а при их отсутствии окисление происходит согласно реакции метаногенеза с накоплением аммонийного азота [45].

Высокая концентрация сульфат ионов в морской воде позволяет окислять гораздо больше органического углерода, чем в пресных грунтовых водах [22, 28], и приводит к высоким концентрациям NH₄⁺ при осолонении грунтовых вод [31]. Деструкция органического вещества с участием растворенного O₂, в соответствии со стехиометрией Редфилда, сопровождается выделением в среду NO₃⁻, при этом верхний предел содержания NH₄⁺ в пресных грунтовых водах составляет менее 0.04 мкмоль/л [31]. Понижение DIN может быть связано с денитрификацией – превращением азота (NO₃⁻ + NO₂⁻ + NH₄⁺) микроорганизмами в газовые формы (NO, N₂O и N₂) и последующее

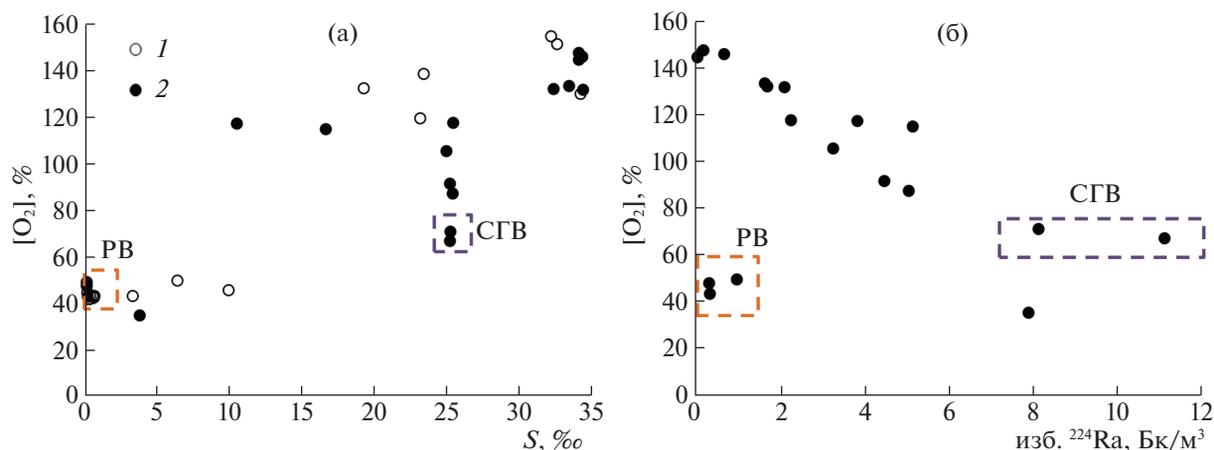


Рис. 7. Зависимость насыщения вод кислородом от солености (а) и от активности изв. ²²⁴Ra (б). 1 – поверхностный слой воды, 2 – придонный слой воды. PB – речные воды, СГВ – субмаринные грунтовые воды.

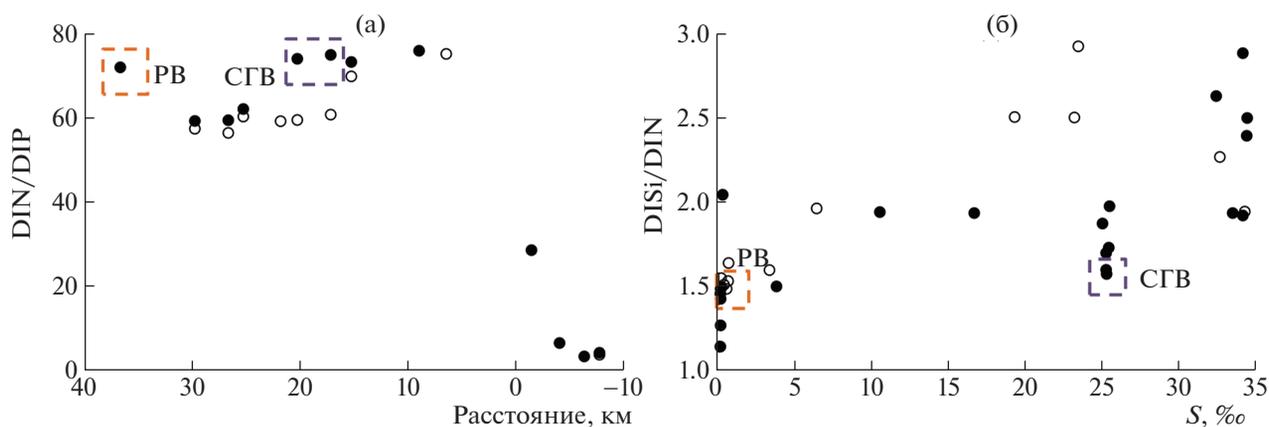


Рис. 8. Зависимость DIN/DIP от расстояния, отложенного от устьевого бара реки (а) и DISi/DIN от солености (б). 1 – поверхностный слой воды, 2 – придонный слой воды. PB – речные воды, СГВ – субмаринные грунтовые воды.

удаление из среды, что отмечалось в эстуарии Раздольной [16].

Макрокомпонентный состав

Полученные результаты по макрокомпонентному составу в водах эстуария р. Раздольная приведены в табл. 3. Здесь же для сравнения различных типов вод указаны весовые ион-хлорные отношения (отношения концентрации ионов к концентрации Cl⁻-иона, выраженные в единицах г/кг / г/кг) для исследованных вод и стандартной морской воды [27]. Анализируемые в данной работе макрокомпоненты составляют около 99.66% от общего веса растворенных в морской и речной воде веществ и могут быть, следовательно, использованы для полной характеристики солевого состава исследуемых вод. Общий солевой состав был оценен через величину общей минерализации (Σ_i), которая является суммой макрокомпо-

нентов: $\Sigma_i = [Na^+] + [K^+] + [Ca^{2+}] + [Mg^{2+}] + [SO_4^{2-}] + [Cl^-] + [HCO_3^-]$.

Для характеристики химического состава речной воды в эстуарии Раздольной была выбрана точка с минимальной Σ_i (ст. 1), а морской – с максимальной Σ_i (придонная вода на ст. 6, см. табл. 3). В речной воде (ст. 1) среди катионов доминирует Ca²⁺, отношение Ca²⁺/TZ⁺ = 0.466. Отношения Na⁺/TZ⁺, Mg²⁺/TZ⁺ и K⁺/TZ⁺ составляли 0.243, 0.244 и 0.024 соответственно. Основным противоионом для катионов является HCO₃⁻, TA/TZ⁻ = 0.600. Отношения SO₄²⁻/TZ⁻ и Cl⁻/TZ⁻ составляли соответственно 0.168 и 0.141. Концентрация Cl⁻ ионов в речной воде в 1000 раз ниже, чем в морской, а величины ион-хлорных отношений макрокомпонентов, особенно Ca²⁺/Cl⁻ и HCO₃⁻/Cl⁻, повышены в реке по сравнению с морской водой в десятки раз (см. табл. 3). Таким образом, слабо-

Таблица 2. Соленость – S (‰) и концентрация биогенных веществ (мкМ/л) – DIP, DSi, NO₂⁻, NO₃⁻, NH₄⁺, DIN, Total P, Total N в придонном и поверхностном слоях воды

№ станции	S	DIP	DSi	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺	DIN	Total P	Total N
1 _д	0.13	2.85	268.71	1.07	172.81	63.52	237.39	3.47	248.48
2 _д	0.14	3.27	331.51	1.15	167.56	65.67	234.38	4.59	238.48
3 _п	0.14	3.96	333.89	1.17	162.16	63.19	226.52	4.84	240.49
3 _д	0.13	3.91	333.90	1.20	166.72	63.13	231.05	4.81	232.68
4 _п	0.18	3.88	335.46	1.20	157.24	59.84	218.28	4.64	229.94
4 _д	0.20	3.77	330.67	1.14	161.18	60.62	222.93	4.63	226.96
5 _п	0.37	3.66	328.98	1.13	159.39	59.11	219.63	4.39	226.82
5 _д	3.78	3.28	301.58	1.21	146.42	55.13	202.76	4.00	210.32
6 _п	0.54	3.75	325.69	1.21	162.13	57.61	220.95	4.32	230.43
6 _д	25.19	0.70	89.34	1.18	43.20	11.98	56.36	1.36	67.89
7 _п	0.63	3.60	324.05	1.18	156.25	55.89	213.31	4.20	227.50
7 _д	25.23	0.76	87.82	1.13	43.54	11.59	56.26	1.35	68.80
8 _п	0.67	3.35	330.38	1.19	147.78	54.18	203.15	4.15	215.73
8 _д	25.37	0.66	84.01	0.93	35.78	12.23	48.93	1.30	56.87
9 _п	3.31	2.46	271.82	1.19	126.18	44.20	171.57	3.33	176.22
9 _д	25.19	0.71	87.82	0.85	39.18	12.08	52.11	1.38	60.30
10 _п	9.92	2.97	324.56	1.27	148.64	46.02	195.92	3.92	208.61
10 _д	24.95	0.59	82.56	0.71	34.29	9.39	44.39	1.42	55.54
11 _п	6.38	1.50	218.38	1.01	84.33	26.76	112.09	2.47	129.92
11 _д	25.40	0.50	81.73	0.51	34.11	7.03	41.65	1.36	53.02
12 _д	10.49	1.23	208.08	0.92	84.02	23.07	108.00	2.10	123.06
13 _д	16.63	0.82	159.40	0.71	66.95	15.31	82.96	1.97	93.49
14 _п	23.13	0.36	77.28	0.36	26.61	4.11	31.08	1.17	45.52
14 _д	32.34	0.21	15.27	0.11	4.57	1.16	5.84	1.11	14.15
15 _п	23.38	0.44	120.36	2.56	35.12	3.72	41.40	1.26	60.92
15 _д	34.07	0.22	4.17	0.09	0.80	0.56	1.45	1.01	10.05
16 _п	32.16	0.17	79.24	0.57	28.93	2.86	32.35	1.16	34.50
16 _д	34.32	0.52	4.01	0.05	1.16	0.47	1.68	1.47	2.42
17 _п	34.20	0.22	1.60	0.05	0.32	0.46	0.83	0.99	2.53
17 _д	34.36	0.23	2.40	0.01	0.66	0.30	0.97	1.11	4.53

Примечание: индексами “п” и “д” обозначены, соответственно, строки данных для поверхностных и придонных слоев воды.

минерализованная речная вода в нижнем течении Раздольной в период зимней межени 2020 г. была гидрокарбонатно-кальциевой. В районе разгрузки грунтовых вод (ст. 6, см. табл. 3) среди катионов в наибольшем количестве присутствует Na⁺ (Na⁺/TZ⁺ = 0.766), а среди анионов – Cl⁻ (Cl⁻/TZ⁻ = 0.901); ион-хлорные отношения макрокомпонентов хорошо согласуются с принятыми значениями для морской воды [27].

ВЫВОДЫ

1. Разгрузка СГВ является источником радионуклида ²²⁴Ra и приурочена к наиболее глубоководному створу в вершине эстуария р. Раздольная.
2. Разгрузка СГВ формирует придонное течение осолоненных вод в направлении моря и положительную температурную аномалию, которая сопровождается снижением толщины льда на протяжении зоны смешения.

Таблица 3. Общий солевой состав (Σ_i , г/кг), концентрации (ммоль/кг) и весовые ион-хлорные отношения главных ионов в эстуарии р. Раздольная

№ станции	Σ_i	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	SO ₄ ²⁻ /Cl ⁻	Na ⁺	Na ⁺ /Cl ⁻	K ⁺	K ⁺ /Cl ⁻	Ca ²⁺	Ca ²⁺ /Cl ⁻	Mg ²⁺	Mg ²⁺ /Cl ⁻
1 _п	0.19	0.37	0.23	1.66	0.66	1.15	0.07	0.19	0.63	1.92	0.33	0.61
3 _п	0.21	0.74	0.24	0.88	0.93	0.82	0.07	0.11	0.63	0.97	0.37	0.34
4 _п	0.21	0.73	0.24	0.90	0.93	0.83	0.07	0.11	0.63	0.98	0.36	0.34
5 _п	0.25	1.39	0.27	0.53	1.44	0.67	0.08	0.07	0.65	0.53	0.42	0.21
5 _д	0.52	5.83	0.48	0.22	4.88	0.54	0.15	0.03	0.72	0.14	0.82	0.10
6 _п	0.41	3.99	0.40	0.27	3.46	0.56	0.14	0.04	0.68	0.19	0.63	0.11
6 _д	24.05	373.10	19.66	0.14	319.61	0.56	6.01	0.02	7.15	0.02	38.65	0.07
7 _п	0.74	9.39	0.67	0.19	7.66	0.53	0.23	0.03	0.77	0.09	1.11	0.08
7 _д	23.81	370.39	19.48	0.14	314.47	0.55	5.84	0.02	7.08	0.02	38.87	0.07
8 _п	0.56	6.55	0.50	0.20	5.47	0.54	0.18	0.03	0.72	0.12	0.85	0.09
9 _п	0.64	7.81	0.57	0.20	6.43	0.53	0.19	0.03	0.74	0.11	0.96	0.08
10 _п	0.99	13.77	0.81	0.16	10.97	0.52	0.28	0.02	0.82	0.07	1.46	0.07
Стандартная морская вода [27]				0.14		0.56		0.02		0.02		0.07

Примечание: индексами “п” и “д” обозначены соответственно строки данных для поверхностных и придонных слоев воды.

3. Насыщение вод кислородом имеет отрицательную корреляцию с радионуклидом ²²⁴Ra, что указывает на участие потока СГВ в формировании кислородного режима зоны смешения вод в эстуарии р. Раздольная в период ледостава.

4. В районе разгрузки СГВ отмечено повышение соотношения DIN/DIP и понижение соотношения DISi/DIN.

5. Состав стабильных изотопов и макрокомпонентов в районе разгрузки субмаринных грунтовых вод определяется смешением морских и речных вод.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента МК-153.2020.5, программы госадаптации ТОИ ДВО РАН (рег. № 121-21500052-9, АААА-А20-120011090005-7).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Важова А.С., Зуенко Ю.И.* Особенности распределения биогенных элементов вдоль градиента солености в эстуариях рек Суходол и Раздольная (залив Петра Великого, Японское море) // Известия ТИНРО. 2015. Т. 180. С. 226–235.
2. *Гомоюнов К.А.* Гидрологический очерк Амурского залива и реки Суйфуна // Производительные силы Дальнего Востока. Тр. 1-й конф. Владивосток, 1927. Вып. 2. С. 73–91.
3. *Звалинский В.И., Недашковский А.П., Сагалаев С.Г. и др.* Биогенные элементы и первичная продукция эстуария реки Раздольной (Амурский залив, Японского моря) // Биология моря. 2005. Т. 31. № 2. С. 107–116.
4. *Звалинский В.И., Марьяш А.А., Тищенко П.Я. и др.* Продукционные характеристики эстуария реки Раздольной в период ледостава // Известия ТИНРО. 2016. Т. 185. С. 155–174.
5. *Кондратьева Л.М., Андреева Д.В., Уткина А.С.* Изменение состава органических веществ в подземных водах в зоне речной фильтрации после наводнения // Геоэкология. 2018. № 6. С. 21–30.
6. *Методы гидрохимических исследований основных биогенных элементов.* М.: ВНИРО, 1988. 120 с.
7. *Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши.* Л.: Гидрометеиздат, 1986. Т. 1. Вып. 21. 387 с.
8. *Михайлов В.Н.* Гидрологические процессы в устьях рек. М.: ГЕОС, 1997. 176 с.
9. *Михайлов В.Н., Горин С.Л.* Новые определения, районирование и типизация устьевых областей рек и их частей—эстуариев // Водные ресурсы. 2012. Т. 39. № 3. С. 243–257.
10. *Павлова Г.Ю., Тищенко П.Я., Ходоренко Н.Д. и др.* Основной солевой состав и карбонатное равновесие в поровой воде осадков эстуария реки Раздольной (Амурский залив, Японское море) // Тихоокеанская геология. 2012. Т. 31. № 3. С. 69–80.
11. *Павлова Г.Ю., Тищенко П.Я., Михайлик Т.А. и др.* Гидрохимический режим эстуария реки Раздольной (Амурский залив, Японское море) // Вода: химия и экология. 2014. № 12 (78). С. 16–25.
12. *Семкин П.Ю., Тищенко П.Я., Лобанов В.Б. и др.* Структура и динамика вод в эстуарии реки Партизанской (Японское море) // Водные ресурсы. 2019. Т. 46. № 1. С. 24–34.
13. *Семкин П.Ю., Тищенко П.Я., Лобанов В.Б. и др.* Обмен вод в эстуарии реки Раздольной (Амурский за-

- лив, Японское море) в период ледостава // Известия ТИНРО. 2019. Т. 196. С. 123–137.
14. Симонов А.И. Гидрология и гидрохимия устьевого взморья. М.: Гидрометеиздат, 1969. 230 с.
 15. Тищенко П.Я., Вонг Ч.Ш., Волкова Т.И. и др. Карбонатная система эстуария реки Раздольной (Амурский залив Японского моря) // Биология моря. 2005. Т. 31. № 1. С. 51–60.
 16. Тищенко П.Я., Семкин П.Ю., Тищенко П.П. и др. Гипоксия придонных вод эстуария реки Раздольная // Доклады Академии наук. 2017. Т. 476. № 5. С. 576–580.
 17. Тищенко П.Я., Семкин П.Ю., Павлова Г.Ю. и др. Гидрохимия эстуария реки Туманной (Японское море) // Океанология. 2018. Т. 58. № 2. С. 192–204.
 18. Ферронский В.И., Поляков В.А. Изотопия гидросферы Земли. М.: Научный мир, 2009. 632 с.
 19. Чаркин А.Н., Дударев О.В., Салюк А.Н. и др. Короткоживущие изотопы ^{224}Ra и ^{223}Ra в системе река Анадырь – Берингово море // Доклады Академии наук. 2017. Т. 476. № 1. С. 51–54.
 20. Челноков Г.А., Харитоновна Н.А., Зыкин Н.Н., Верещагина О.Ф. Генезис подземных минеральных вод Раздольненского проявления (Приморский край) // Тихоокеанская геология. 2008. Т. 27. № 6. С. 65–72.
 21. Anderson M.P. Heat as a ground water tracer // Ground Water. 2005. V. 43. № 6. P. 951–968.
 22. Arndt S., Jørgensen B.B., La Rowe D.E. et al. Quantifying the degradation of organic matter in marine sediments: a review and synthesis // Earth-Science Reviews. V. 123. P. 53–86.
 23. Burnett W. C., Aggarwal P. K., Aureli A. et al. Quantifying submarine groundwater discharge in the coastal zone via multiple methods // Science of The Total Environment. 2006. V. 367. Is. 2–3. P. 498–543.
 24. Craig H. Isotopic variations in meteoric waters // Science. 1961. V. 133. №. 3465. P. 1702–1703.
 25. Funahashi I T., Kasai A., Ueno M., Yamashita Y. Effects of Short Time Variation in the River Discharge on the Salt Wedge Intrusion in the Yura Estuary, a Micro Tidal Estuary, Japan // Journal of Water Resource and Protection. 2013. V. 5. P. 343–348.
 26. Guo X., Xu B., Burnett W.C. et al. Does submarine groundwater discharge contribute to summer hypoxia in the Changjiang (Yangtze) River Estuary? // Science of the Total Environment. 2020. V. 719. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137450>
 27. Guide to Best Practices for Ocean CO₂ Measurements / A.G. Dickson, C.L. Sabine, J.R. Christian (eds.). PICES Special Publication, 2007. 191 p.
 28. Jakobsen R., Postma D. In situ rates of sulfate reduction in an aquifer (Rømø, Denmark) and implications for the reactivity of organic matter // Geology. 1994. V. 22. № 12. P. 1101–1106.
 29. Larsen, F., Tran, L., Van Hoang, H. et al. Groundwater salinity influenced by Holocene seawater trapped in incised valleys in the Red River delta plain // Nature Geoscience. 2017. V. 10. P. 376–381.
 30. Luo X., Jiao J.J. Submarine groundwater discharge and nutrient loadings in Tolo Harbor, Hong Kong using multiple geotracer-based models, and their implications of red tide outbreaks // Water Research. 2016. V. 102. P. 11–31.
 31. Luo X., Jiao J.J., Moore W.S. et al. Significant chemical fluxes from natural terrestrial groundwater rival anthropogenic and fluvial input in a large-river deltaic estuary // Water Research. 2018. V. 144. P. 603–615.
 32. Moore W.S. Large groundwater inputs to coastal waters revealed by ^{226}Ra enrichments // Nature. 1996. V. 380. P. 612–614.
 33. Moore W.S. The subterranean estuary: a reaction zone of ground water and sea water // Marine Chemistry. 1999. V. 65. № 1–2. P. 111–125.
 34. Moore W.S. The effect of submarine groundwater discharge on the ocean // Annual Review of Marine Science. 2010. V. 2. P. 59–88.
 35. Moore W. S., Arnold R. Measurement of ^{223}Ra and ^{224}Ra in coastal waters using delayed coincidence counter // Journal of Geophysical Research. 1996. V. 101. P. 1321–1329.
 36. Parizi E., Hosseini S.M., Ataie-Ashtiani B., Simmons C.T. Vulnerability mapping of coastal aquifers to seawater intrusion: review, development and application // Journal of Hydrology. 2019. V. 570. P. 555–573.
 37. Regnier P., Dale A.W., Arndt S. et al. Quantitative analysis of anaerobic oxidation of methane (AOM) in marine sediments: a modeling perspective // Earth-Science Reviews. 2011. V. 106. № 1. P. 105–130.
 38. Seawater intrusion in coastal aquifers – concepts, methods and practices / J. Bear., Cheng A.H.-D, S. Sorek, D. Ouazar, I. Herrera (Eds.). The Netherlands, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. 1999. P. 625.
 39. Shulkin V.M., Tishchenko P.Ya., Semkin P. Yu., Shvetsova M.G. Influence of river discharge and phytoplankton on the distribution of nutrients and trace metals in Razdolnaya River estuary, Russia // Estuarine, Coastal and Shelf Science. 2018. V. 211. P. 166–176.
 40. Spiteri C., Van Cappellen P., Regnier P. Surface complexation effects on phosphate adsorption to ferric iron oxyhydroxides along pH and salinity gradients in estuaries and coastal aquifers // Geochim. et Cosmochim. Acta. 2008. V. 72. P. 3431–3445.
 41. Shen Y., Xin P., Yu X. Combined effect of cutoff wall and tides on groundwater flow and salinity distribution in coastal unconfined aquifers // Journal of Hydrology. 2020. V. 581. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124444>
 42. Taniguchi M., Burnett W.C., Cable J. E., Turner J.V. Investigation of submarine groundwater discharge // Hydrological Processes. 2002. V. 16. P. 2115–2129.
 43. Watanabe, K., Kasai, A., Antonio, E.S. et al. Influence of salt-wedge intrusion on ecological processes at lower trophic levels in the Yura Estuary, Japan // Estuarine, Coastal and Shelf Science. 2014. V. 139. P. 67–77.
 44. Wang X., Baskaran M., Su K., Du J. The important role of submarine groundwater discharge (SGD) to derive nutrient fluxes into River dominated Ocean Margins – The East China Sea // Marine Chemistry. 2018. V. 204. P. 121–132.
 45. Wang Y., Jiao J.J. Origin of groundwater salinity and hydrogeochemical processes in the confined Quaternary aquifer of the Pearl River Delta, China // Journal of Hydrology. 2012. V. 438. P. 112–124.

ISOTOPIC, HYDROLOGICAL AND HYDROCHEMICAL INDICATORS OF SUBMARINE GROUNDWATER DISCHARGE IN THE ESTUARY OF RAZDOLNAYA RIVER (AMURSKY BAY, SEA OF JAPAN) IN THE ICE COVERED PERIOD

P. Yu. Semkin^{a, #}, P. Ya. Tishchenko^a, A. N. Charkin^a, G. Yu. Pavlova^a, E. V. Anisimova^a, Yu. A. Barabanshchikov^a, T. A. Mikhailik^{a, b}, E. Yu. Tibenko^a, P. P. Tishchenko^a, M. G. Shvetsova^a, and E. M. Shkirknikova^a

^a *Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far East Branch, Russian Academy of Sciences, ul. Baltiiskaya, 43, Vladivostok, 690041 Russia*

^b *St. Petersburg branch, VNIRO (GosNIORKH named after L.S. Berg) nab. Makarova, 26, St. Petersburg, 199053 Russia*

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

Geochemical, hydrological and hydrochemical studies of the water in the Razdolnaya River Estuary and the upper aquifer were made in the ice covered period of 2020. Submarine groundwater (SGD) was discovered on the basis of the activity of radionuclides ^{224}Ra at a distance of 22 km from the mouth river bar. In the groundwater and in the SGD region of estuary, the isotopic composition of water $\delta^{18}\text{O}$ and δD and the ratio of major ions of water were similar of the sea water. The direct current with a velocity of up to 15 cm/s predominates. High activity of ^{224}Ra in the range of 11.1 ± 0.1 to 2.2 ± 0.05 Bq/m³ and a height water temperature – plus 1.1°C in the bottom layer of the estuary indicate the flow of the saline water from the SGD area to the Amursky Bay. According to the measurements performed in 2014, the temperature increased to 2.5°C in the area of SGD influence during the winter season. The ice thickness decreased along the mixing zone to 20 cm (the ice thickness outside the mixing zone was 90 cm). A decrease in the oxygen saturation and a response in the ratios of the main nutrients were observed in the SGD area of the Razdolnaya Estuary. The main reason for SGD is the intrusion of sea water into the uppermost aquifer and its infiltration through sediments in the reach of river.

Keywords: ^{224}Ra , $\delta^{18}\text{O}$ and δD isotopes, submarine groundwater discharge (SGD), estuary, mixing zone, dissolved oxygen, nutrients, major ions of water

REFERENCES

- Vazhova, A.S., Zuenko, Yu.I. *Osobennosti raspredeleniya biogennykh elementov vdol' gradienta solenosti v estuariyakh rek Sukhodol i Razdol'naya (zaliv Petra Velikogo, Yaponskoe more)* [Distribution of nutrients along the salinity gradient in the estuaries of the Sukhodol and Razdolnaya rivers (Peter the Great Bay, Sea of Japan)]. *Izvestiya TINRO*, 2015. V. 180. P. 226–235. (in Russian)
- Gomoyunov, K.A. *Gidrologicheskii ocherk Amurskogo zaliva i reki Suifuna* [Hydrological studies of the Amur Bay and the Suifuna River]. *Proizvoditel'nye sily Dal'nego Vostoka. Tr. I konf* [Productive forces of the Far East. Proc. 1st Conf.]. Vladivostok, 1927. № 2. P. 73–91. (in Russian)
- Zvalinskii, V.I., Nedashkovskii, A.P., Sagalaev, S.G. et al. *Biogennye elementy i pervichnaya produktsiya estuariya reki Razdol'noi (Amurskiy zaliv, Yaponskogomorya)* [Nutrients and primary production of the estuary of the Razdolnaya River (Amur Bay, Sea of Japan)]. *Biologiyamorya*, 2005. V. 31. № 2. P. 107–116. (in Russian)
- Zvalinskii, V.I., Mar'yash, A.A., Tishchenko, P.Ya et al. *Produktsynnye kharakteristiki estuariya reki Razdol'noi v period ledostava* [Production patterns in the estuary of the Razdolnaya River in period of freezing]. *Izvestiya TINRO*, 2016. V. 185. P. 155–174. (in Russian)
- Kondratyeva, L.M., Andreeva, D.V., Utkina, A.S. *Izmeneniye sostava organicheskikh veshchestv v podzemnykh vodakh v zone rechnoi fil'tratsii posle navodneniya* [Change in the composition of organic substances in groundwater in the river filtration zone after a flood]. *Geoekologiya*, 2018. № 6. P. 21–30. (in Russian)
- Metody gidrokhimicheskikh issledovaniy osnovnykh biogennykh elementov* [Methods of hydrochemical studies of nutrients]. Moscow, VNIRO, 1988, 120 p. (in Russian)
- Mnogoletnie dannye o rezhime i resursakh poverkhnostnykh vod sushi* [Long-term data on the regime and resources of land surface water]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1986. V. 1. № 21. 387 p. (in Russian)
- Mikhailov, V.N. *Gidrologicheskie protsessy v ust'yakh rek* [Hydrological processes in river mouths]. Moscow, GEOS, 1997, 176 p. (in Russian)
- Mikhailov, V.N., Gorin, S.L. *Novye opredeleniya, rayonirovaniye i tipizatsiya ust'yevykh oblastei rek i ikh chastei – estuariyev* [New definitions, regionalization and typification of estuarine areas of rivers and their parts – estuaries]. *Vodnye resursy*, 2012. V. 39. № 3. P. 243–257. (in Russian)
- Pavlova, G.Yu., Tishchenko, P.Ya., Khodorenko, N.D. et al. *Osnovnoi solevoi sostav i karbonatnoe ravnovesie v porovoi vode osadkov estuariya reki Razdol'noi (Amurskii zaliv, Yaponskoye more)* [The main salt composition and carbonate equilibrium in pore water of sediments of the estuary of the Razdolnaya River (Amur Bay, Sea of Ja-

- pan)]. *Tikhookeanskaya geologiya*, 2012. V. 31. № 3. P. 69–80. (in Russian)
11. Pavlova, G.Yu., Tishchenko, P.Ya., Mikhailik, T.A. et al. *Gidrokhimicheskii rezhim estuariya reki Razdol'noi (Amurskii zaliv, Yaponskoye more)* [Hydrochemical regime of the estuary of the Razdolnaya River (Amur Bay, Sea of Japan)]. *Voda: khimiya i ekologiya*, 2014. № 12 (78). P. 16–25. (in Russian)
 12. Semkin, P.Yu., Tishchenko, P.Ya., Lobanov, V.B. et al. *Struktura i dinamika vod v estuarii reki Partizanskoj (Yaponskoye more)* [Water structure and dynamics in the estuary of the Partizanskaya River (Sea of Japan)]. *Vodnye resursy*, 2019. V. 46. № 1. P. 24–34. (in Russian)
 13. Semkin, P.Yu., Tishchenko, P.Ya., Lobanov, V. B. et al. *Obmen vod v estuarii reki Razdol'noi (Amurskii zaliv, Yaponskoye more) v period ledostava* [Water exchange in the estuary of the Razdolnaya River (Amursky Bay, Sea of Japan) during the ice covered period]. *Izvestiya TINRO*, 2019. V. 196. P. 123–137. (in Russian)
 14. Simonov, A.I. *Gidrologiya i gidrokhiymiya ust'yevogo vz-mor'ya* [Hydrology and hydrochemistry of the estuary]. Moscow, Gidrometeoizdat, 1969, 230 p. (in Russian)
 15. Tishchenko, P.Ya., Wong, C.Sh., Volkova, T.I. et al. *Karbonatnaya sistema estuariya reki Razdol'noi (Amurskii zaliv Yaponskogo morya)* [Carbonate system of the Razdolnaya River estuary (Amur Bay, Sea of Japan)]. *Biologiya morya*, 2005. V. 31. № 1. P. 51–60. (in Russian)
 16. Tishchenko, P.Ya., Semkin, P.Yu., Tishchenko, P.P. et al. *Gipoksiya pridonnykh vod estuariya reki Razdol'naya* [Hypoxia of bottom waters of the estuary of the Razdol'naya River] *Doklady Akademii nauk*, 2017. V. 476. № 5. P. 576–580. (in Russian)
 17. Tishchenko, P.Ya., Semkin, P.Yu., Pavlova, G.Yu. et al. *Gidrokhiymiya estuariya reki Tumanoi (Yaponskoye more)* [Hydrochemistry of the estuary of the Tuman-naya River (Sea of Japan)]. *Okeanologiya*, 2018. V. 58. № 2. P. 192–204. (in Russian)
 18. Ferronskii, V.I., Polyakov, V.A. *Izotopiya gidrosfery Zemli* [Isotopes in the Earth's hydrosphere]. Moscow, Nauchnyi mir Publ., 2009, 632 p. (in Russian)
 19. Charkin, A.N., Dudarev, O.V., Salyuk, A.N. et al. *Korotkozhiyushchie izotopy ^{224}Ra i ^{223}Ra v sisteme reka Anadyr' – Beringovo more* [Short-lived isotopes ^{224}Ra and ^{223}Ra in the Anadyr River - Bering Sea system]. *Doklady Akademii nauk*, 2017. V. 476. № 1. P. 51–54. (in Russian)
 20. Chelnokov, G.A., Kharitonova, N.A., Zykina, N.N., Vereshchagina, O.F. *Genezis podzemnykh mineral'nykh vod Razdol'nenskogo proyavleniya (Primorskii kray)* [Genesis of the mineral groundwater of the Razdol'nenskii occurrence in Primorye]. *Tikhookeanskaya geologiya*, 2008. V. 27. № 6. P. 65–72. (in Russian)
 21. Anderson, M.P. Heat as a ground water tracer. *Ground Water*, 2005. V. 43. № 6. P. 951–968.
 22. Arndt, S., Jørgensen, B.B., La Rowe, D.E. et al. Quantifying the degradation of organic matter in marine sediments: a review and synthesis. *Earth-Science Reviews*, 2013. V. 123. P. 53–86.
 23. Burnett, W. C., Aggarwal, P. K., Aureli, A. et al. Quantifying submarine groundwater discharge in the coastal zone via multiple methods. *Science of The Total En.*, 2006. V. 367. Iss. 2–3. P. 498–543.
 24. Craig, H. Isotopic variations in meteoric waters. *Science*, 1961. V. 133. № 3465. P. 1702–1703.
 25. Funahashi, T., Kasai, A., Ueno, M., Yamashita, Y. Effects of short time variation in the river discharge on the salt wedge intrusion in the Yura estuary, a micro tidal estuary, Japan. *Journal of Water Resource and Protection*, 2013. V. 5. P. 343–348.
 26. Guo, X., Xu, B., Burnett, W.C. et al. Does submarine groundwater discharge contribute to summer hypoxia in the Changjiang (Yangtze) River Estuary? *Science of The Total Environment*, 2020. V. 719:137450. DOI:10.1016/j.scitotenv.2020.137450
 27. Guide to best practices for ocean CO₂ measurements. A.G. Dickson, C.L. Sabine, J.R. Christian, Eds., PIC-ES Special Publication, 2007. 191 p.
 28. Jakobsen, R., Postma, D. In situ rates of sulfate reduction in an aquifer (Rømø, Denmark) and implications for the reactivity of organic matter. *Geology*, 1994. V. 22. № 12. P. 1101–1106.
 29. Larsen, F., Tran, L., Van Hoang, H. et al. Groundwater salinity influenced by Holocene seawater trapped in incised valleys in the Red River delta plain. *Nature Geoscience*, 2017. V. 10. P. 376–381.
 30. Luo, X., Jiao, J.J. Submarine groundwater discharge and nutrient loadings in Tolo Harbor, Hong Kong using multiple geotracer-based models, and their implications of red tide outbreaks. *Water Research*, 2016. V. 102. P. 11–31.
 31. Luo, X., Jiao, J.J., Moore, W.S. et al. Significant chemical fluxes from natural terrestrial groundwater rival anthropogenic and fluvial input in a large-river deltaic estuary. *Water Research*, 2018. V. 144. P. 603–615.
 32. Moore, W.S. Large groundwater inputs to coastal waters revealed by ^{226}Ra enrichments. *Nature*, 1996. V. 380. P. 612–614.
 33. Moore, W.S. The subterranean estuary: a reaction zone of ground water and sea water. *Marine Chemistry*, 1999. V. 65. № 1–2. P. 111–125.
 34. Moore, W.S. The effect of submarine groundwater discharge on the ocean. *Annual Review of Marine Science*, 2010. V. 2. P. 59–88.
 35. Moore, W. S., Arnold R. Measurement of ^{223}Ra and ^{224}Ra in coastal waters using delayed coincidence counter. *Journal of Geophysical Research*, 1996. V. 101. P. 1321–1329.
 36. Parizi, E., Hosseini, S.M., Ataie-Ashtiani, B., Simmons, C.T. Vulnerability mapping of coastal aquifers to seawater intrusion: review, development and application. *Journal of Hydrology*, 2019. V. 570. P. 555–573.
 37. Regnier, P., Dale, A.W., Arndt, S., et al. Quantitative analysis of anaerobic oxidation of methane (AOM) in marine sediments: a modeling perspective. *Earth-Science Reviews*, 2011. V. 106. № 1. P. 105–130.
 38. Seawater intrusion in coastal aquifers – concepts, methods and practices. J. Bear., Cheng A.H.-D, S. Sorek, D. Ouazar, I. Herrera, Eds. The Netherlands, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. 1999. 625 p.
 39. Shulkin, V.M., Tishchenko, P.Ya., Semkin, P.Yu., Shvetsova, M.G. Influence of river discharge and phytoplankton on the distribution of nutrients and trace

- metals in Razdolnaya River estuary, Russia. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2018. V. 211. P. 166–176.
40. Spiteri, C., Van Cappellen, P., Regnier, P. Surface complexation effects on phosphate adsorption to ferric iron oxyhydroxides along pH and salinity gradients in estuaries and coastal aquifers. *Geochim. et Cosmochim. Acta*, 2008. V. 72. P. 3431–3445.
41. Shen Y., Xin P., Yu X. Combined effect of cutoff wall and tides on groundwater flow and salinity distribution in coastal unconfined aquifers // *Journal of Hydrology*. 2020. V. 581. DOI:10.1016/j.jhydrol.2019.124444
42. Taniguchi, M., Burnett, W.C., Cable, J. E., Turner, J.V. Investigation of submarine groundwater discharge. *Hydrological Processes*, 2002. V. 16. P. 2115–2129.
43. Watanabe, K., Kasai, A., Antonio, E.S. et al. Influence of salt-wedge intrusion on ecological processes at lower trophic levels in the Yura Estuary, Japan. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2014. V. 139. P. 67–77.
44. Wang, X., Baskaran, M., Su K., Du, J. The important role of submarine groundwater discharge (SGD) to derive nutrient fluxes into River dominated Ocean Margins – The East China Sea. *Marine Chemistry*, 2018. V. 204. P. 121–132.
45. Wang, Y., Jiao, J.J. Origin of groundwater salinity and hydrogeochemical processes in the confined Quaternary aquifer of the Pearl River Delta, China. *Journal of Hydrology*, 2012. V. 438. P. 112–124.

**ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОПРИРОДНЫЕ
ПРОЦЕССЫ**

УДК 550.834

**ПОВЕДЕНИЕ ГРУНТОВ г. СЫКТЫВКАР ПРИ СЕЙСМИЧЕСКИХ
И МИКРОСЕЙСМИЧЕСКИХ НАГРУЗКАХ**

© 2021 г. В. А. Лютоев^{1,*}, А. Н. Вихоть^{1,**}

¹ *Институт геологии имени академика Н.П. Юшкина Коми научного центра Уральского отделения
Российской академии наук ул. Первомайская, 54, Сыктывкар 167000, Россия*

*E-mail: lutoev@geo.komisc.ru

**E-mail: vikhot.anna@mail.ru

Поступила в редакцию 17.01.2021 г.

После доработки 11.02.2021 г.

Принята к публикации 21.02.2021 г.

С ростом уровня урбанизации возрастает интенсивность транспортных потоков и развивается высотное строительство. В частности, в г. Сыктывкар увеличивается динамическая нагрузка на грунты в основаниях зданий и придомовых территорий. Наряду с этим меняется концепция строительства зданий, однако в настоящее время общая нормативная база в должной форме еще не принята. Рыхлые грунты тиксотропной структуры часто неустойчивы к внешним нагрузкам, поэтому актуальным становится вопрос изучения приращения балльности для местных грунтов, определения предельных значений устойчивости грунтов к местной платформенной рассеянной сейсмичности и микросейсмическому воздействию со стороны вибрационного поля города. Образцы грунтов гляциальных, флювиогляциальных, аллювиальных отложений пластичного состояния и зернистой структуры г. Сыктывкар и его окрестностей испытаны вибродинамическим нагружением с амплитудами ускорений $0.022\text{--}1.9\text{ м/с}^2$, соответствующими магнитудам сотрясения 1.9–6.4 единиц. Наблюдения показали, момент эффективного воздействия для слабых грунтов начинается уже с 5–7 с. Построен график повторяемости землетрясений, выведено эмпирическое уравнение $I(\text{балл}) = 1.3 \times \lg T + 2.3 \pm 0.2$. Установлено, что повтор 7-балльного землетрясения возможен с вероятностью 0.5% в течение 50 лет, 6-балльного – с вероятностью 1% в течение 50 лет, накопление потенциальной сейсмической энергии вблизи г. Сыктывкар вполне вероятно. Получены функциональные зависимости поведения грунтов при нагрузках с магнитудами, соответствующими энергетическим характеристикам землетрясений. Расчеты показали, что приращение балльности зависит от глубины залегания водоносного горизонта. Горизонтальные сдвиговые напряжения, возникающие при распространении поперечных волн, являются основным компонентом напряжений в момент землетрясения. Воздействие вибрационного поля города на подстилающие грунты охватывает более длительный временной промежуток циклических нагрузок. Для расчетов в данном случае предложено решать плоскую задачу для упругого полупространства.

Ключевые слова: *связные и несвязные грунты, землетрясение, приращение балльности, вибродинамическая нагрузка, пиковое ускорение грунта, уплотнение, вторичное изменение*

DOI: 10.31857/S0869780921030048

ВВЕДЕНИЕ

В инженерной геологии особое внимание уделяется изучению урбанизированных территорий, расположенных в долинах рек, сложенных четвертичными отложениями. В г. Сыктывкар и его окрестностях выделено несколько генетических типов отложений: аллювиальный, озерно-болотный, болотный, озерно-аллювиальный, флювиогляциальный, озерно-ледниковый, ледниковый, озерный. Здесь залегают пески крупные, средние, мелкие, пылеватые. Кроме песков в разрезе присутствуют и глинистые грунты с показателем $I_L < 0.5$ при коэффициенте пористости $e = 0.9$ для глин и

суглинков и $e = 0.7$ – для супесей. В отложениях встречаются водонасыщенные пески с показателем $S_r > 0.5$ при различной зернистости. Это указывает на низкую степень устойчивости четвертичных отложений к сейсмическим явлениям. В пределах города мощности рыхлых четвертичных отложений варьируются от 5 до 60 м, сюда же отнесены и моренные отложения (II категория). Именно эти отложения наиболее пригодны для оснований фундаментов высотных зданий г. Сыктывкара, а менее надежны формации грунтов III и IV (особая) категорий. Скальные грунты (I категория) залегают на глубине 200–300 м, в связи с

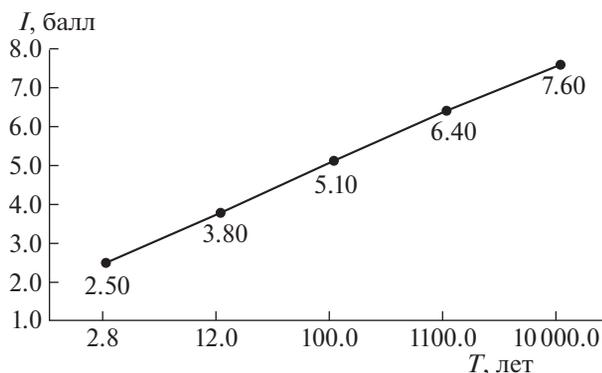


Рис. 1. График повторяемости землетрясений для северной оконечности Волго-Уральской антеклизы.

чем их использование для оснований фундаментов не представляется возможным.

В связи с этим рассмотрим приращение балльности в связных и несвязных рыхлых грунтах, относительно которых происходит усиление или ослабление сейсмических воздействий на дневной поверхности¹. Вместе с тем такие грунты при изменении местных природных и природно-техногенных условий могут перейти в неустойчивое состояние вследствие разрыхления, разжижения, просадки и др. Такие качественные изменения наступают под действием тектонических или микротектонических природно-техногенных явлений, происходящих в слабых грунтах.

К особо опасным объектам г. Сыктывкар можно отнести Сыктывкарский лесопромышленный комплекс, который находится в плейсто-сейстовой области Кировско-Кажимской сейсмогенной зоны [4]. Для определения защитных мер при возведении высотных зданий и сложных промышленных объектов строительства в условиях платформенной сейсмичности необходимо учитывать устойчивость рыхлых грунтов к динамическим нагрузкам [5]. На сейсмической карте ОСР-2015-С южная часть Республики Коми находится в сейсмической зоне, где может произойти 7-балльное землетрясение в районе г. Сыктывкар в течение 50 лет с 1% вероятностью [8, 11]. Поэтому для предупреждения негативных последствий от возможного землетрясения необходимо использование, прежде всего, как классических результатов инженерно-геологических исследований, так и проверки сейсмической устойчивости рыхлых горных пород вибродинамическим нагружением.

Цель исследований – выяснение предельной степени устойчивости рыхлых четвертичных отложений в основаниях фундаментов зданий

¹ СП 14.13330.2018. Строительство в сейсмических районах. М.: Стандартинформ, 2015. 116 с. <http://docs.cntd.ru/document/550565571>

г. Сыктывкар к сейсмическим и микросейсмическим воздействиям.

СЕЙСМИЧЕСКИЕ И МИКРОСЕЙСМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЙ

Сыктывкар расположен в северной части Волго-Уральской антеклизы, в зоне сочленения Сысольского свода, Вычегодского прогиба, Кировско-Кажимского авлакогена. Данный тектонический узел проявляет себя редкой платформенной сейсмичностью с интенсивностью на дневной поверхности от 3 до 5 баллов по МШСИЗ-1². Однако есть исторические сведения о землетрясении и большей балльности, например, Сысольское землетрясение [10], произошедшее в 1939 г., которое было зафиксировано сейсмическими станциями: “Свердловск”, “Москва”, “Пулково”, “Фрунзе”, “Андижан”. Максимальная сила сотрясений в поверхностном слое по макросейсмическим данным достигала семи баллов по МШСИЗ-18 [1, 2]. Используя статистические данные и параметры местных слабых землетрясений [11], привлекая модели зон ВОЗ ОСР-97 (А, В, С, D), по своду правил³ построен график повторяемости землетрясений (рис. 1), и на его основе выведено эмпирическое уравнение: I (балл) = $1.3 \lg T + 2.3 \pm 0.2$, где T – период повторяемости землетрясений в годах. Гистограмма средневзвешенной оценки магнитуды и интенсивности землетрясения представлена на рис. 2.

Анализируя график вероятности сейсмических событий, можно предположить, что повтор 7-балльного землетрясения в рамках максимального расчетного землетрясения возможен с вероятностью 0.5% в течение 50 лет и 6-балльного землетрясения с вероятностью 1% в течение 50 лет. Следовательно, при данных сейсмических условиях с учетом расположения геологических структур, разграниченных глубинными разломами, постепенное накопление потенциала сейсмической энергии вблизи г. Сыктывкар становится вполне вероятно.

Поэтому возникает необходимость изучения инженерно-геологических условий с точки зрения зависимости приращения балльности от грунтовых условий. Местной особенностью является то, что скальные грунты на данной территории находятся на относительно большой глубине, поэтому дисперсные грунты имеют большие мощности фактически на всей территории горо-

² ГОСТ 34511-2018. Землетрясения. Макросейсмическая шкала интенсивности. М.: Стандартинформ, 2019. 23 с. <http://docs.cntd.ru/document/1200163880>

³ СП 286.1325800.2016. Объекты строительные повышенной ответственности. Правила детального сейсмического районирования. М.: Стандартинформ, 2016. 29 с. <http://docs.cntd.ru/document/456085879>

да. Кроме того, они часто обводнены, в связи с чем велика вероятность существенного усиления балльности. В скальных грунтах приращение балльности – 0 баллов (I категория); в песках оно зависит от крупности зерен и глубины залегания УГВ, может достигать 0.7–2.0 баллов (III категория); в связных грунтах – 0.3–1.6 баллов (II категория) [4].

Микросейсмические шумы слабы и для города не опасны. Фоновые значения микросейсмических колебаний при преобладающих частотах 0.5–2 Гц для горизонтальных компонент амплитуды – $2 \cdot 10^{-11}$ м, для вертикальных – 10^{-11} м [6]. Вибросейсмический мониторинг по компонентам x , y и z показывает, что не менее 70% территории города находятся в условиях сверхнормативной вибронгрузки по виброускорению и виброскорости: большая площадь превышения отмечается по компоненте z , в наименьшей степени – по компоненте x [7].

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для испытаний использовалась вибродинамическая установка, способная развивать амплитуду ускорения колебаний от 0.022 м/с^2 до 1.9 м/с^2 , что соответствует ускорению динамического воздействия от 1.9 до 6.4 единиц магнитуды. Грунты были отобраны специальным керноотборником, позволяющим сохранить их первичные структурные связи.

Величины ускорений, соответствующие указанным магнитудам, создавались с помощью вибродинамической установки, где при циклических испытаниях отобранных грунтов они могут достигать величин, сопоставимых с ускорениями землетрясений. Для этого использовали генератор колебаний АЯЦМ 3.901.002 ТУ (250 Вт) весом 35 кг; частотный преобразователь ГРИВ 426449.001 от 1 до 30 Гц с возможностью плавного усиления величины уровня вибраций, способный задавать амплитуды ускорений от 0.022 до 1.9 м/с^2 в интервале соответствия энергии магнитуды (табл. 1) в рамках шкалы балльности МШИЗ-18; датчик вертикального смещения грунта – электронные индикаторные часы ИЦ-12.5 с ценой деления 0.01 мм при диапазоне измерений от 0 до 12.5 мм, погрешность измерения ± 0.015 мм; подставку для крепления датчика смещения и керновый держатель вместе с испытуемым грунтом, вес которого менялся от 1.2 до 1.6 кг. Все выше приведенное оборудование жестко закреплено на железной плите массой 115 кг. Градуировка уровня ускорений была установлена с помощью широкополосного сейсмометра “ZET 048-C”, имеющего диапазон ускорений от 0.3 до 400 Гц, это позволило зафиксировать диапазон ускорений от 0.0022 до 0.19 g (см. табл. 1). Погрешность в измерениях

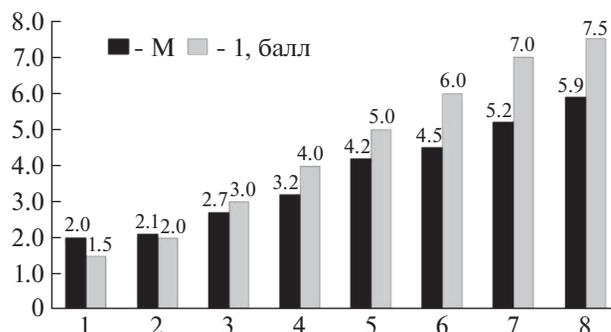


Рис. 2. Средневзвешенная оценка магнитуды и интенсивности землетрясения относительно значений пикового ускорения грунта (peak ground acceleration – PGA, м/с^2).

при испытаниях зернистых грунтов составила 7–10%, пластичных – 5–7%.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Всего было испытано 26 образцов грунта из интересующих нас горизонтов – от низкой прирусловой поймы до самой верхней флювиогляциальной террасы (рис. 3). В результате их испытаний было выяснено, что в данном диапазоне нагрузений пылеватые и мелкие маловлажные пески переходят из стадии уплотнения в стадию разрыхления, а при наличии свободной воды – в стадию разжижения. Что касается глин и суглинков, то их первичные структурные связи уже при амплитуде 0.053 м/с^2 начинают претерпевать изменения, а при увеличении длительности колебаний начинают разрушаться и водно-коллоидные связи, вследствие чего грунты переходят в пластично-текучее и текучее состояние.

Во время эксперимента было замечено, что длительность воздействия также влияет на снижение первоначальной прочности испытуемых грунтов. При этом время эффективного воздействия для слабых грунтов начинается уже с 5–7 с. Общая же длительность испытания грунтов составляла 20–30 с, что соответствует времени формирования сейсмических акселерограмм при тектонических сдвигах в геологических разрезах, включающих рыхлые отложения.

По результатам были построены зависимости в виде кривых (см. рис. 3 и табл. 1) при постепенном увеличении амплитуд колебаний динамического воздействия на четвертичные грунты и при росте ускорения от минимальной величины 0.022 до максимальной – 1.9 м/с^2 .

Одновременно с этим были определены табличные значения, имеющие свои условные соотношения между величиной ускорения и магнитудой, а также интенсивностью видимых изменений от динамических воздействий. Таким образом,

Таблица 1. Динамические испытания и предельное приращение балльности для грунтов г. Сыктывкар относительно магнитуд от минимального до максимального значения

№ п/п	$a, \text{ м/с}^2$	$a \cdot g$	M	$I, \text{ балл}$
1	0.022	0.0022	1.9	I
2	0.026	0.0026	2.0	I
3	0.031	0.0031	2.1	II
4	0.037	0.0037	2.2	II
5	0.043	0.0043	2.3	II
6	0.053	0.0053	2.5	III
7	0.066	0.0066	2.7	III
8	0.078	0.0078	2.9	III
9	0.087	0.0087	3.2	IV
10	0.13	0.013	3.5	IV
11	0.21	0.021	3.8	V
12	0.31	0.031	4.2	V
13	0.38	0.038	4.5	VI
14	0.47	0.047	5.2	VI
15	0.59	0.059	5.5	VII
16	0.70	0.070	5.7	VII
17	0.86	0.086	5.9	VIII
18	1.22	0.122	6.1	VIII
19	1.28	0.128	6.2	VIII
20	1.51	0.151	6.3	VIII
21	1.9	0.19	6.4	VIII

Примечание: $a, \text{ м/с}^2$ – ускорение колебаний, $a \cdot g$ – относительное ускорение, M – магнитуда Рихтера, I – МШСИЗ-18.

были получены соотношения между параметрами количественного и качественного содержания (табл. 2).

В настоящее время общепризнан факт, что большая часть колебаний грунтового массива во время землетрясений генерируется вертикально направленными объемными волнами, зарождающимися в очаге в скальных породах [3, 9]. В целом сейсмическая волна состоит из объемных волн: P -волны сжатия–растяжения и S -волны сдвига, приходящей с небольшим задержанием в несколько секунд по отношению к продольной волне; и поверхностных волн L и R , которые проявляют себя с меньшей интенсивностью. В случае прохождения через водонасыщенные грунты или воду эффект разрушения продольной волны ослабевает. Напряжение, возникающее при распространении поперечных волн, является наиболее опасным в виду большей амплитудной сдвиговой составляющей, которая равна произведению массы грунта на глубину очага землетрясения с учетом коэффициента затухания сейсмических волн.

Исходя из полученных соотношений, можно перейти к рассмотрению вопроса о приращении балльности, указывающей на качественный характер и масштаб воздействия на подстилающие грунты в основании фундаментов зданий. При распространении волн сжатия и сдвига в мало-влажных грунтах возникает трехосная деформация, которую можно выразить общей формулой [3]:

$$\frac{\sigma dh}{\sigma dv} = \frac{\nu}{1 - \nu},$$

где σdh – нормальные горизонтальные напряжения, σdv – нормальные вертикальные напряжения, ν – коэффициент Пуассона. Приращение балльности в этих условиях возникает за счет взаимодействия акустических жесткостей между слоями разреза.

В случае водонасыщенного грунта общее уравнение выглядит следующим образом:

$$\frac{\Delta V_w}{nV} = C1 \cdot u,$$

где ΔV_w – величина сжимаемости, nV – объем воды в порах грунта, $C1$ – сжимаемость самой воды, u – поровое давление.

Приращение балльности в этих условиях возникает в зависимости от глубины залегания водоносного горизонта. При этом в обоих случаях горизонтальные сдвиговые напряжения, возникающие при распространении поперечных волн, являются основным компонентом напряжений в момент землетрясения.

Что касается влияния природно-техногенной составляющей в виде длительных микроколебаний на подстилающие грунты от вибрационного поля города, то повторяющиеся циклы колебаний занимают больший временной промежуток, что постепенно меняет первоначальную структуру поверхностных грунтов. Теоретически для расчета таких воздействий на полупространство условной величины по поверхности P_0 и шириной $2a$, где действует двухмерная плоская нагрузка, принимается сообщение напряжений грунту в направлении от увеличения к ослаблению по мере движения автотранспорта. При этом основная роль отводится инженерным решениям, связанным с определением функциональных зависимостей, затрагивающих как условно линейные, так и нелинейные свойства грунтов верхнего полупространства. Важным моментом является определение пиковых ускорений (PGA) от землетрясений, взрывов, транспортного потока и других источников возмущения техносферы, которые подвергают грунты сдвиговым деформациям с последующей их структурной реорганизацией: если диапазон деформаций – 10^{-6} – 10^{-4} д.е. малый, то задача решается с позиции упругой модели, когда определяется модуль Юнга; если дефор-

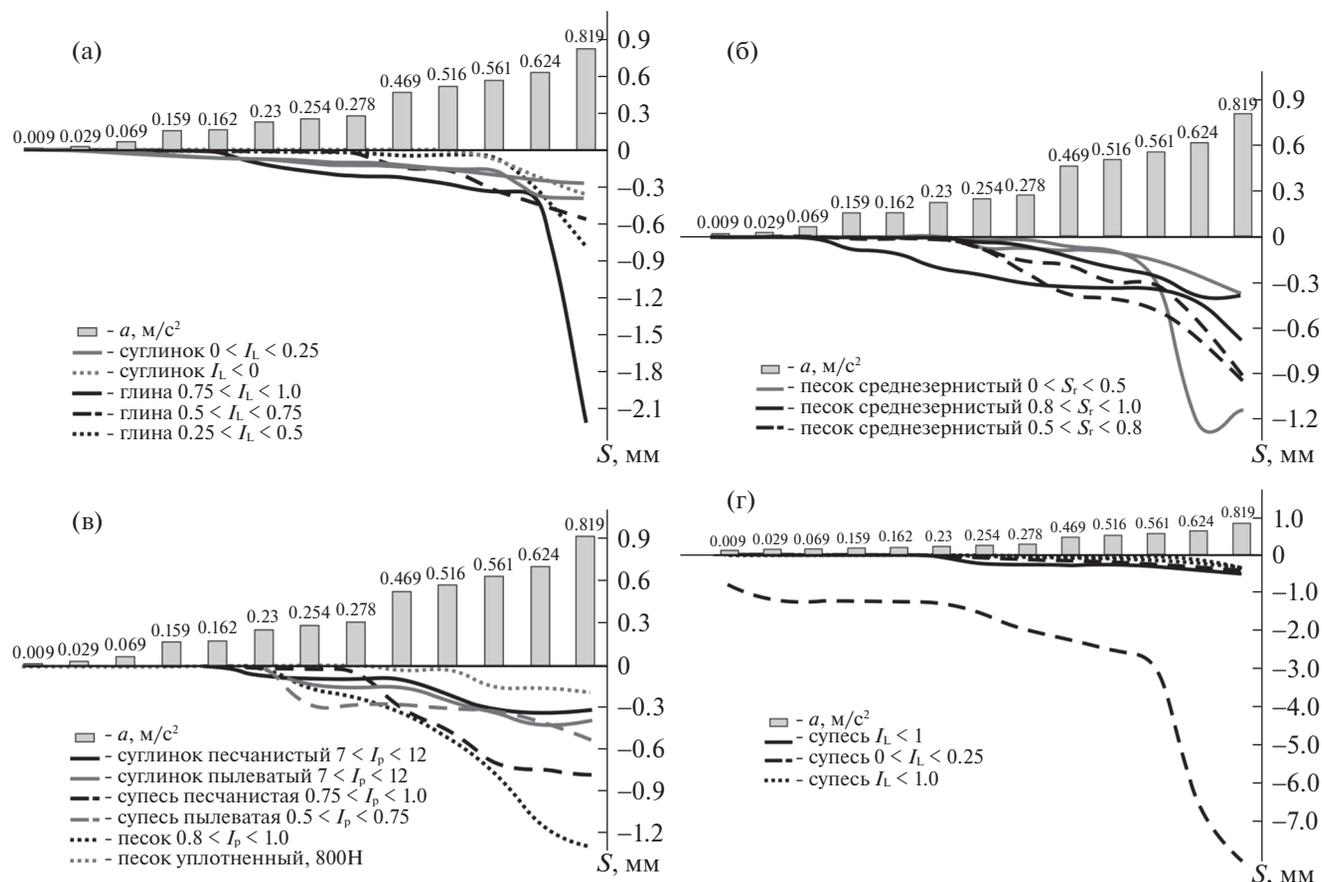


Рис. 3. Функциональные кривые зависимости поведения связных и несвязных грунтов от интенсивности вибрационной нагрузки: а – глин и суглинков; б – песков; в – переотложенных техногенных грунтов; г – супесей.

мация принимает значения $>10^{-2}$ д.е., то изменение структуры грунта характеризуется гистерезисом прогрессирующего типа, в таком случае необходимо применять пошаговое интегрирование.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С учетом исторических и инструментальных сведений о местных сейсмических событиях, отмеченных на карте ОСР-97, исходя из полученного эмпирического уравнения, можно утверждать, что для Сыктывкара возможны следующие вероятные величины интенсивности проектного и максимально расчетного землетрясений:

1. ОСР-97А с 10% вероятностью $I = 5$ баллов в течение 50 лет (за 100 лет);
2. ОСР-97В с 5% вероятностью $I = 5$ баллов в течение 50 лет (за 500 лет);
3. ОСР-97С с 1% вероятностью $I = 6$ баллов в течение 50 лет (за 5000 лет);
4. ОСР-97Д с 0.5% вероятностью $I = 7$ баллов в течение 50 лет (за 10000 лет).

Исследования показали, что в условиях возрастающей нагрузки сейсмического и микросей-

смического характера на грунты под фундаментами зданий вибродинамические испытания грунтов очень важны в виду того, что нагрузки подобного характера приводят к изменениям структуры грунтов и их физико-механических свойств. В частности, для г. Сыктывкар дополнительно принятые меры, исходя из результатов испытаний, позволят повысить этажность строительства. На данный момент при заложении фундаментов требуется соблюдение действующих норм жилищного строительства, учитывающих инженерно-геологические условия в соответствии со сводом правил⁴:

- 1) участки развития ледниковых отложений (гПрщ) в геологическом разрезе по условиям строительства относятся к территориям с удовлетворительными несущими свойствами грунтов, здесь допустимо строительство многоэтажных зданий, с учетом результатов испытаний повышенная этажность представится возможной;

⁴ СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений. М., 2017. 160 с.
<http://docs.cntd.ru/document/456054206>

Таблица 2. Результаты исследований влияния вибраций на поведение грунтов

$a, \text{ м/с}^2$	0.009	0.029	0.069	0.159	0.162	0.23	0.254	0.378	0.469	0.516	0.561	0.624	0.819
Пески пылеватые													
$0.5 \leq S_r \leq 0.8$						3.6/VI				5.2/VII		5.7/VIII	
Пески мелкозернистые													
$0.5 \leq S_r \leq 0.8$			2.7/III		3.5/IV						5.5/VII		
$0 \leq S_r \leq 0.5$					3.2/IV						5.2/VI	5.7/VIII	
$0.8 \leq S_r \leq 1$						3.6/VI		4.5/VII			5.5/VIII		
Пески тонкозернистые													
$0.8 \leq S_r \leq 1$						3.6/VI				5.3/VII		5.7/VIII	
Пески среднезернистые													
$0 \leq S_r \leq 0.5$							3.8/IV				5.5/VII		5.8/VIII
$0.5 \leq S_r \leq 0.8$							3.8/V				5.5/VII		5.8/VIII
$0.8 \leq S_r \leq 1$													5.9/IX
Пески крупнозернистые													
$0.8 \leq S_r \leq 1$						3.6/VI				5.3/VII		5.7/VIII	
Глины													
$0.75 \leq I_L \leq 1$		2.0/III								5.2/VII	5.5/VII		
$0.5 \leq I_L \leq 0.75$				3.5/IV					4.4/VI		4.5/VII		
$0.25 \leq I_L \leq 0.5$					3.5/V				4.5/VI			4.5/VII	
$0 \leq I_L \leq 0.25$			2.7/III									4.5/VI	
Суглинки													
$0 \leq I_L \leq 0.25$			2.7/III			3.7/IV					4.5/VI		
$I_L < 0$						3.8/IV				×	4.5/V		
Супеси													
$I_L > 1$	1.9/IV				3.0/IV								4.7/VIII
$I_L < 0$													4.7/VI
Смешанные грунты													
Дресва+ песок СЗП $0 \leq S_r \leq 0.5$							3.8/V						5.7/VII
УТГ $0.8 \leq S_r \leq 1$						3.6/VI		4.5/VII					
УТГ (800 Н) $0 \leq S_r \leq 0.5$									5.2/VI		5.5/VII		
Г+П+Съ	1.9/IV				3.5–3.6/V	3.8/VI			5.2/VI				5.7/VII
Съ+ТЗП					3.6/V				5.2/VII		5.5/VIII		
Сг+СЗП					3.7/VI				5.2/VII			5.7/VIII	
Г+Сг					3.5/V			5.2/VI				5.7/VII	

Примечание: УТГ – уплотненный техногенный грунт, 800 Н – сила, приложенная на уплотнение, Г – глина, СЗП – средне-зернистый песок, П – песок, Съ – супесь, ТЗП – тонкозернистый песок, Сг – суглинок.

2) участки аллювиальных отложений третьей надпойменной террасы ($a^3\Pi s-l$), озерно-аллювиальных отложений третьей и второй надпойменных террас ($la^2\Pi b z-p$, $la^3\Pi s-l$), верхне-вычегодский подгоризонт, флювиогляциальные отложения зан-

дровой равнины ($f\Pi v\check{c}_3$) пригодны к возведению на них зданий средней этажности, допускается возможность строительства 6–9-этажных зданий;

3) на участках аллювиальных и озерно-болотных отложений первой надпойменной террасы

(a^1IV_1 , $IbIV_3$) и аллювиальных отложений второй террасы ($a^2IIIbz-p$) допускается строить 1–2-этажные дома из легких материалов, не рекомендуется повышать этажность строительства в виду нерентабельности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ананьин И.В.* К вопросу проявления некоторых землетрясений в восточной части Восточно-Европейской платформы. Исследование сейсмической опасности // Вопросы инженерной сейсмологии. 1988. Вып. 29. С. 119–124.
2. *Андреев С.С.* О сейсмической характеристике Русской платформы // Изв. АН СССР. Сер. геофиз. 1956. № 12. С. 1484–1487.
3. *Ишихара К.* Поведение грунтов при землетрясениях: Пер. с англ. СПб.: НПО “Геореконструкция-Фундамент-проект”, 2006. 384 с.
4. *Лютеев В.А.* Акселерограммы сильных движений Сыктывкара // Вестник Института геологии КНЦ УрО РАН. 2018. № 11. С. 12–21.
5. *Лютеев В.А.* Вибросейсмь и их влияние на геологическую среду в районе ТЭЦ Сыктывкарского ЛПК // Вопросы инженерной сейсмологии. 2008. Т. 35. № 2. С. 20–42.
6. *Лютеев В.А.* Сейсмогенные зоны Республики Коми и особенности микросейсмораионирования г. Сыктывкара: автореф. дисс. ... канд. геол.-мин. наук. Сыктывкар, 2001. 32 с.
7. *Лютеев В.А., Вихоть А.Н.* Влияние оползневых процессов и природно-техногенной микросейсмичности на геологическую среду города Сыктывкара. Сыктывкар: ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, 2019. 84 с.
8. *Носкова Н.Н., Михайлова Р.С.* Республика Коми и Кировская область // Землетрясения Северной Евразии. 2011. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2017. С. 228–238.
9. *Павленко О.В.* Сейсмические волны в грунтовых слоях: нелинейное поведение грунта при сильных землетрясениях последних лет. М.: Науч. мир, 2009. 260 с.
10. *Тимонин Н.И.* Сысольское землетрясение 1939 г. (материалы опроса) // Коми научный центр УрО РАН АН СССР. Сыктывкар, 1986.
11. *Удортин В.В., Носкова Н.Н.* Современные землетрясения // Вест. Института геологии. 2010. № 9. С. 40–42.

GROUND BEHAVIOR IN SYKTYVKAR UNDER SEISMIC AND MICROSEISMIC IMPACT

V. A. Lyutov^{a,#} and A. N. Vikhot^{a,##}

^a *Yushkin Institute of Geology, Komi Scientific Center, Ural Branch, Russian Academy of Sciences
ul. Pervomaiskaya, 54, Syktyvkar, 167000 Russia*

[#] *E-mail: lutoev@geo.komisc.ru*

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

Urbanization growth results in the increasing traffic intensity and developing high-rise construction. In particular, in Syktyvkar, the dynamic loading on soils in building foundations and adjacent territories rises. The conception of civil engineering changes, but at present the regulatory standards has not been adopted there yet. Loose soils of thixotropic structure are often unstable to external load; therefore, the study of seismic score increment for local soils, determination of threshold values of soil resistance to local platform dissipated seismicity and microseismic impact from the urban vibration field becomes acute. Samples of glacial, fluvioglacial, and alluvial deposits of the plastic state and granular structure collected in Syktyvkar and its outskirts were tested by vibrodynamic loading with acceleration amplitudes of 0.022–1.9 m/s² corresponding to shock magnitudes of 1.9–6.4 units. According to observations, the effective impact moment for loose soils began already at 5–7 s. The graph of an occurrence frequency of earthquakes was plotted, and the empirical equation was deduced: $I(\text{point}) = 1.3 \times \log T + 2.3 \pm 0.2$. It was established that recurrence of a magnitude 7 earthquake is possible with a 0.5% probability within 50 years, a magnitude 6 earthquake—with a probability of 1% within 50 years, and accumulation of a potential seismic energy near Syktyvkar is quite probable. The functional dependencies of soil behavior have been obtained under loads corresponding to energy earthquakes characteristics. Calculations showed that the earthquake intensity increment depends on the aquifer depth. Horizontal shear stresses arising from a shear-wave propagation are the main stress component upon an earthquake. The vibration field impact on underlying soils of the city covers a longer time period of cyclic loads. In this case, for calculations we propose to solve a flat stress problem for an elastic half-space.

Keywords: *coherent and incoherent soils, earthquake, earthquake intensity increment, vibrodynamic loading, PGA, soil compaction, secondary changes*

REFERENCES

1. Anan'in, I.V. *K voprosy proyavleniya nekotorykh zemletryaseni v vostochnoi chasti Vostochno-Evropейskoi platformy. Issledovanie seismicheskoi opasnosti* [On the issue of manifestation of some earthquakes in the eastern part of the East European platform. Seismic hazard study]. *Voprosy inzhenernoi seismologii* [Problems in engineering seismology]. 1988. Iss. 29. P. 119–124. (in Russian)
2. Andreev, S.S. *O seismicheskoi kharakteristike Russkoi platformy* [About seismic characteristics of the Russian platform]. *Izvestiya AN SSSR. Ser. geofiz.*, 1956. № 12. P. 1484–1487. (in Russian)
3. Ishihara, K. *Soil behaviour in earthquake geotechnics*. Oxford, Clarendon press, 1996. 181 p.
4. Lyutoev, V.A. *Akselerogrammy sil'nykh dvizhenii Syktyvkara* [Basis of seismic microundation for Syktyvkar]. *Vestnik Instituta geologii KHTs UrO RAN*, 2018, no. 11. P. 12–21. (in Russian)
5. Lyutoev, V.A. *Vibroseismy i ikh vliyanie na geologicheskuyu sredy v raione TETs Syktyvkarского LPK* [Vibro-seisms and their effect on the geoenvironment in the area of Syktyvkar heating plant]. *Voprosy inzhenernoi seismologii* [Problems in engineering seismology]. 2008. Iss. 35. № 29. P. 20–42. (in Russian)
6. Lyutoev, V.A. *Seismogennyye zony Respubliki Komi i osobennosti mikroseismoraionirovaniya g. Syktyvkara* [Seismogenic areas of the Komi Republic and specific features of microzoning in Syktyvkar]. Extended abstract of Cand. Sci. (Geol.-Min.) dissertation, Syktyvkar, 2001, 32 p. (in Russian)
7. Lyutoev, V.A., Vikhot', A.N. *Vliyanie opolznevykh protsessov i prirodno-tekhnogennoi mikroseismichnosti na geologicheskuyu sredy goroda Syktyvkara* [The impact of landslide processes as well as natural and human-induced seismicity on the geological environment of the Syktyvkar city]. Syktyvkar, FITs Komi NTs UrO RAN, 2019, 84 p. (in Russian)
8. Noskova, N.N., Mikhailova, R.S. *Respublika Komi i Kirovskaya oblast'* [The Komi Republic and the Kirov region]. *Zemletryaseniya Severnoi Evrazii. 2011* [Earthquakes of the Northern Eurasia. 2011], Obninsk, FITs EGS RAN, 2017. P. 228–238. (in Russian)
9. Pavlenko, O.V. *Seismicheskie volny v gruntovykh sloyakh: nelineinoe povedenie grunta pri sil'nykh zemletryasenyakh poslednikh let* [Seismic waves in soil layers: nonlinear soil behavior in recent strong earthquakes]. Moscow, Nauchnyi mir Publ., 2009, 260 p. (in Russian)
10. Timonin, N.I. *Sysol'skoe zemletryasenie 1939 g. (materialy oprosa)* [Earthquake in the year 1939 (inquiry data)]. Syktyvkar, Komi NTs UrO RAN, 1986. (in Russian)
11. Udoratin, V.V., Noskova, N.N. *Sovremennyye zemletryaseniya* [Modern earthquakes]. *Vestnik Instituta geologii KHTs UrO RAN*, 2010. № 9. P. 40–42. (in Russian)

ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ РАЙОНИРОВАНИЕ

УДК 624.131

ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ РАЙОНИРОВАНИЕ АРКТИЧЕСКОГО ШЕЛЬФА РОССИИ

© 2021 г. А. Е. Рыбалко^{1,2,3,*}, М. С. Захаров^{1,**}, В. А. Щербаков^{1,***}, А. С. Локтев^{1,3,****}

¹ *Всероссийский научно-исследовательский институт геологии и минеральных ресурсов Мирового океана имени академика И.С. Грамберга Английский проспект, д. 1, Санкт-Петербург, 190121 Россия*

² *Институт наук о Земле Санкт-Петербургского государственного университета
10-я линия Васильевского острова, д. 31–33, Санкт-Петербург, 190000 Россия*

³ *Центр морских исследований МГУ им. М.В. Ломоносова
Ленинские горы, владение 1, строение 77, Москва, 119992 Россия*

*E-mail: alek-rybalko@yandex.ru

**E-mail: zhmike@mail.ru

***E-mail: victor-shcherbakov@mail.ru

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

Поступила в редакцию 18.12.2020 г.

После доработки 03.02.2021 г.

Принята к публикации 13.02.2021 г.

Рассмотрены методические принципы инженерно-геологического районирования, обоснована таксономическая шкала единиц районирования, проанализированы основные факторы, определяющие инженерно-геологическую обстановку в различных районах арктического шельфа, представлена карта-схема инженерно-геологического районирования арктического шельфа России в масштабе 1 : 15000000. В пределах выделенных районов дана обобщающая характеристика инженерно-геологических условий.

Ключевые слова: инженерно-геологическое районирование, арктический шельф, инженерно-геологический регион, область, район, историко-генетическое обоснование районирования, таксономия и типология инженерно-геологических условий

DOI: 10.31857/S0869780921030085

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность обзорного инженерно-геологического картографирования шельфа окраинных морей Северного Ледовитого Океана определяется целями и задачами Государственной Программы “Социально-экономическое развитие Арктической зоны Российской Федерации”, утвержденной Постановлением Правительства РФ от 31.08.2017 №1064. В ходе реализации данной программы ожидается до 2025 г. “...организация производства конкурентоспособной высокотехнологичной продукции для нужд геологоразведки, добычи и переработки минерального сырья, обеспечивающей повышение энергоэффективности процессов освоения минеральных ресурсов на основе принципов ресурсосбережения и рационального природопользования”. В паспорте подпрограммы 1 “Формирование опорных зон развития и обеспечения их функционирования...” указана необходимость обеспечения реализации проектов хозяйственного освоения арктических территорий и континентального шельфа, а также обеспечение безопас-

ности зданий и сооружений в районах опасных геокриологических процессов. Целевыми индикаторами выполнения данной подпрограммы являются “...количество подготовленных проектов методических и аналитических документов, используемых для принятия управленческих решений; ...количество разработанных научно-обоснованных аналитических документов, нормативно-технических документов и рекомендаций по геотехническому мониторингу, изысканиям, проектированию, строительству и эксплуатации зданий и сооружений в опорных зонах развития Арктической зоны РФ”. Указана необходимость широкого информирования о деятельности государства в Арктической зоне граждан РФ и средств массовой информации, усиление позиций РФ в международных организациях, расширение взаимовыгодного международного сотрудничества в Арктике. Инженерно-геологические карты шельфовой зоны окраинных морей Северного Ледовитого океана непосредственно вписываются в данную программу и могут занять достойное место в Нацио-

нальном Атласе Арктики, составление которого предусматривается в рамках подпрограммы “Государственная регистрация прав, кадастра и картографии”.

Инженерно-геологическое районирование территорий, включая и дно акваторий, является важным шагом для сравнения и оценки разнообразия инженерно-геологических условий различных территорий, позволяя понять основные закономерности формирования инженерно-геологической обстановки и сформулировать типовые требования к проектированию и строительству инженерных объектов.

Районирование – деление территории или дна акватории на части, различающиеся между собой и в чем-то однородные внутри себя. Картографическое районирование является основным методом специализированной характеристики и оценки любой территории по заранее отобранному признакам. Практическая сущность районирования связана с решением конкретных задач объединения территорий, акваторий или геологических тел, обладающих относительным сходством по некоторому набору признаков, и их отделения от соответствующих единиц, этими признаками не обладающих. Районирование всегда носит целенаправленный характер, вытекающий из четко сформулированной в научном или практическом плане цели. Карты районирования выполняют особую информационную функцию, адресуются определенному потребителю и должны обеспечивать высокий уровень понимания и обобщения информации. Инженерно-геологическое районирование следует рассматривать как комплекс логических приемов объемного и содержательного обобщения и упрощения информации, диктуемых определенной целью и выполняемых на основе некоторого первоначального раздела геопространства [4].

Чаще всего обзорное инженерно-геологическое районирование историко-генетического характера использует трехступенчатую схему с выделением таких таксономических единиц как регион, области разного порядка и районы разного порядка (иногда подрайоны). Основоположник отечественного направления инженерно-геологического районирования И.В. Попов вообще придерживался практики двухступенчатого районирования на уровне регионов и районов, когда для выделения районов используются те же признаки, что и для регионов, но с большей детализацией в более узких пределах [13]. При этом районы выделяются по признаку общности строения пород коренной основы (на уровне формаций и субформаций), строения и состава поверхностных отложений, гидрогеологических условий геоморфологической обстановки и современных геологических процессов [14]. Указанные прин-

ципы были успешно развиты при составлении монографии “Инженерная геология СССР” (см. том 1, 1978, под редакцией И.С. Комарова) и закреплены в специальном выпуске в 1990 г. (см. “Инженерная геология СССР. Шельфы СССР” под редакцией К.И. Джанджгавы, И.С. Комарова, Я.В. Неизвестнова и др. [5, 6]).

Проблемы инженерно-геологического районирования арктического шельфа начинаются с недостаточной изученности инженерно-геологической обстановки в пределах арктического бассейна и усугубляются невозможностью в полной мере использовать опыт такого районирования по суше, поскольку объекты районирования имеют совершенно разное целеполагание для такого картографического обобщения и различный набор факторов, которые следует привлекать к построению карт районирования суши и подводного пространства. Поэтому в статье представлен сугубо авторский подход к проблеме инженерно-геологического районирования и подбор соответствующих картографических решений. Для решения поставленных задач в полной мере были проанализированы базы данных и картографические материалы обзорного районирования Нечерноземной зоны Европейской зоны РФ, Западно-Сибирской низменности, Казахстана и других регионов Евразийского континента. В полной мере следует признать существенные успехи советской (российской) школы регионального инженерно-геологического анализа и картографирования, заложенные трудами акад. Е.М. Сергеева и его последователей.

При инженерно-геологическом районировании арктического шельфа РФ авторы столкнулись с рядом весьма трудных и специфических задач, решение которых вероятно будет продолжаться и дискутироваться в ближайшее время. При этом за рамками обсуждения пока остается постановка задачи и разработка методики инженерно-геологического картирования и районирования для смешанных объектов прибрежной зоны в составе “суша–море”, например, для номенклатурных листов миллионного масштаба.

ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ИЗУЧЕННОСТЬ АРКТИЧЕСКОГО ШЕЛЬФА РОССИИ

При современном уровне изученности Арктического шельфа России можно с уверенностью утверждать, что наиболее достоверные и сравнимые сведения имеются по рельефу дна, которые были получены в результате практически полного покрытия морского дна в пределах шельфовых областей гидрографическими съемками разного времени и качества. Итогом этих работ явилась созданная в России “Карта рельефа дна Северного Ледовитого океана масштаба 1 : 5000000”, из-

Таблица 1. Инженерно-геологическое районирование шельфа арктических морей России

Инженерно-геологические регионы (ИГРГ)	Западно-Арктический (I)		Восточно-Арктический (II)	
	Баренцевская (I-A)	Карская (I-B)	Лаптевоморская (II-A)	Восточносибирско-Чукотская (II-B)
Инженерно-геологические области (ИГО)				
Инженерно-геологические районы (ИГР)	I-A-1... I-A-9	I-B-1... I-B-7	II-A-1... II-A-4	II-B-1... II-B-7

данная в 1998 г. [7], для которой основные черты формирования рельефа и методика районирования шельфовых морей на морфоструктурной основе были сформулированы Г.Д. Нарышкиным [11].

Исходя из особенностей морфоструктуры, уже длительное время выделяются два региона – Западно-Арктический и Восточно-Арктический шельф. Первый отличается большей расчлененностью дна, относительной погруженностью (бровка континентального шельфа располагается на глубинах более 300 м, достигая в желобах отметок 700 м) и во многом сформировался при влиянии процессов континентального оледенения [2, 10, 12]. Второй – это относительно мелководный шельф, с практически выровненным характером донной поверхности, где максимальные уклоны не превышают долей градуса. Здесь практически не было покровного оледенения и главным фактором формирования рыхлых (четвертичных) отложений выступали трансгрессивно-регрессивные колебания уровня моря.

В результате сформировались принципиально различные структуры, что оказывает решающее воздействие на инженерно-геологические условия. На востоке через континентальную окраину проходит Лаптевская рифтогенная зона, сменяемая Новосибирской зоной горстов и грабенов. Вся восточная часть шельфа входит в состав Восточно-Сибирско-Чукотского бассейна, а со стороны суши к морям этого региона подходят, главным образом, складчатые горные хребты [3, 5]. При этом приморская часть шельфа является продолжением структур, протягивающихся с моря и названных вследствие этого группой авторов из ФГБУ ВНИИОкеангеология “сквозными” [3]. Они обладают сходными геоморфологическими элементами, что в свое время позволило исследователям ВНИИОкеангеологии трактовать приморский участок суши восточносибирских морей, как “палеошельф”. Все эти особенности позволили С.Г. Миронюку вслед за многими предшественниками при сравнении инженерно-геологических условий шельфовой арктической зоны России отнести Баренцево и Карское моря к гляциальным шельфам, а море Лаптевых, Восточно-

сибирское и Чукотское – к перигляциальным [8–10].

ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДИКИ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКОГО РАЙОНИРОВАНИЯ АРКТИЧЕСКОГО ШЕЛЬФА

Как было отмечено выше, общепринятой методики инженерно-геологического районирования шельфа в выбранном масштабе не существует, поэтому предлагаемая схема является авторской разработкой, которая базируется на специальном подборе признаков районирования, подтверждаемых уровнем изученности и достоверностью исходного материала. Исходя из сказанного, с полным правом можно в качестве инженерно-геологических регионов (ИГРГ) выделить Западно-Арктический шельф и Восточно-Арктический шельф (табл. 1).

При выделении инженерно-геологических областей (ИГО) во главу угла ставился анализ истории формирования морфоструктуры. Таким образом, в первом регионе в качестве областей были выделены западная и восточная его части. Первая ИГО, учитывая геологическую историю формирования и характер рельефа, относится к классическим гляциальным шельфам с расчлененной поверхностью и значительными глубинами, которые связаны, вероятно, с недокомпенсированностью гляциоизостатического поднятия [8, 10].

В последнее время использование новых систем сейсмоакустической аппаратуры и детальные инженерно-геологические изыскания на перспективных участках под бурение на нефть и газ позволили детально отследить различные типы ледниковых отложений на Баренцевом море и западной части Карского моря [9]. В геоструктурном отношении большая часть этой области относится к Баренцево-Карской окраинно-материковой плите.

Вторая ИГО расположена восточнее островов Новой Земли, значительная часть ее относится к затопленной окраине Западно-Сибирской плиты, и только самая восточная окраина находится в пределах орогенных областей Таймыра и Северной Земли. Эта область сочетает в себе черты гля-

циального шельфа, особенно в западной части, и типичных шельфовых равнин, расположенных на плитном чехле, рельеф которых формировался под воздействием трансгрессивно-регрессивных циклов. Кроме того, сам разрез четвертичных отложений, а также рельеф морского дна существенно отличаются от первой ИГО. Это практически плоская равнина с незначительным расчленением, с полным отсутствием моренных гряд на большей части морского дна. Мощность четвертичных отложений существенно возрастает, в том числе за счет появления в разрезе нижнеэоценовых и даже эоценовых горизонтов. Здесь гораздо большим распространением пользуются многолетнемерзлые породы (ММП), а мелководность большей части данной ИГО предопределяет появление в рельефе морского дна многочисленных погребенных речных долин. Так как практически названные области совпадают с границами одноименных морей, то они соответственно получили название Баренцевская и Карская (см. табл. 1).

В структурно-тектоническом отношении в пределах Восточно-Арктического ИГРГ можно также выделить две структурно предопределенные области.

Первая, западная, территориально совпадающая с морем Лаптевых, относится к зонам активных в настоящее время геологических структур, связанных с раскрытием ложа Северного Ледовитого океана и отраженных на схемах тектонического районирования как Лаптевская рифтогенная зона и Новосибирская зона горстов и грабенов [3]. Однако сложная геологическая структура здесь маскируется современным равнинным рельефом, развитым на мерзлых породах или реликтовых пластовых льдах. Соответственно, данная ИГО получила название Лаптевской.

Границы второй области менее четкие. Со структурных позиций она почти целиком относится к Чукотско-Востоносибирскому бассейну. Большая часть шельфа к востоку от Новосибирских островов представляет собой типичную равнину с глубинами до 150 м, расчлененную четкими палеодолинами, которые являются продолжением современных рек, тальвеги которых достигают бровки шельфа. С другой стороны, в Чукотском море четко обозначены подводные поднятия островов Врангеля и Геральда, а большая часть побережья имеет ярко выраженный лагунный характер, что нетипично для других участков шельфа арктических морей. Однако, совершенно недостаточный объем фактического материала, прежде всего сейсмоакустического профилирования и инженерно-геологического бурения не дает оснований для более детального районирования этой области, и она выделяется как объединенная Востоносибирско-Чукотская.

Для выделения инженерно-геологических районов (ИГР) использовался принцип смешанного районирования, учитывающий, как индивидуальные характеристики, так и определенную типологию инженерно-геологической обстановки в целом. В качестве первых рассматривались специфические морфоскульптурные характеристики в пределах той или иной акватории (равнины, впадины, возвышенности, желоба, островные мелководья, эстуарии, строение береговой зоны – типы берегов), в качестве вторых – особенности современных процессов литодинамики, определяющие устойчивость и закономерности современного развития инженерно-геологической обстановки в целом.

С этой точки зрения, можно выделить районы преимущественно аккумулятивного типа развития (АК) – 1 тип, денудационного типа развития (ДЕН) – 2 тип, смешанного типа (АК-ДЕН) – 3 тип, транзитного типа развития (ТР) – 4 тип. Соответственно для районов 1 типа характерна относительно *стабильная инженерно-геологическая обстановка, определяемая накоплением мощных покровных отложений*; для районов 2 типа – *неустойчивая и изменчивая по пространству и по времени инженерно-геологическая обстановка, определяемая соотношением процессов денудации и размыва*; для районов 3 типа – *переходная нестационарная инженерно-геологическая обстановка, определяемая режимом аккумулятивно-денудационных процессов, сильно изменчивых по пространству и по времени*; для районов 4 типа – *нестабильная инженерно-геологическая обстановка, определяемая процессами направленного размыва коренного ложа и разнонаправленного переноса донных отложений*.

По мере накопления фактического материала и мониторинга гидро-литодинамических процессов, связанных с глобальными климатическими изменениями, появится возможность построения более чуткой и последовательной типологии инженерно-геологических условий и учета индивидуальных особенностей отдельных участков шельфа, особенно в прибрежной зоне. Таким образом, табл. 2 следует рассматривать как временное решение вопроса, на основе которого в будущем будут последовательно развернуты как типологические, так и индивидуальные схемы районирования.

Важный момент при составлении схемы районирования для целей картографирования – подбор наиболее выразительных изобразительных средств. Главное изобразительное селективное средство – цвет, был отдан типам инженерно-геологических районов:

– бледно-зеленый – районам с относительно стабильной инженерно-геологической обстановкой, определяемой накоплением мощных по-

Таблица 2. Характеристика инженерно-геологических районов (до границы подводного берегового склона)

Инженерно-геологические районы	Типовые характеристики районов					Мерзлотно-динамические и другие опасные природные процессы
	Геоморфологические особенности	Гидролитодинамические процессы	Литология поверхностных отложений и типы грунтов	Сейсмические и неотектонические явления	Литология поверхностных отложений и типы грунтов	
	Баренцевская ИГО					
Районы лодочных впадин и желобов (1-A-1)	Фрагменты аккумулятивных нефелюидных равнин, приуроченных к впадинам впадин (Кольскому и Новоземельскому) и локальным впадинам внутришельфовых желобов с углами наклона склонов 1°–10° и более. Глубины 100–200 м	Нефелюидное осадконакопление со слабым влиянием придонных течений, с малоактивной литодинамикой. Вдоль бортов – слабо выраженные склоновые процессы. В желобах присутствуют гляциотурбидитовые толщи	Большая часть поверхности дна занята песчаными илами небольшой мощности, перекрывающими различные ИГК. Встречается грубообломочный материал ледового разноса	Слабая сейсмическая активность впадин «Линии Карпинского». Интенсивность движений затухает от раннего к позднему голоцену	ММП практически отсутствуют. На склонах – слабо выраженные гравитационные процессы с преобладанием оплываний. В бортах желобов выявлены толщи гляциотурбидитов	
Южно-Мурманский район (1-A-2)	Денудационное субгоризонтальное плато. Южно-Мурманской банки со склонами крутизной 3°–5°. Глубины 60–150 м	Зона придонных слабых течений, препятствующих современному нефелюидному осадконакоплению	Преобладают пески, перекрывающие связные грунты, уплотненные, иногда переуплотненные	Асейсмичная зона	ММП практически отсутствуют	
Южно-Баренцево-морский район (1-A-3)	Аккумулятивная морская поздне-неоплейстоценовая равнина с отдельными участками и склонами крутизной до 1°–5°. Глубины до 300 м. Отдельные моренные гряды и узкие ложбины	Преобладание слабого течения воздействия на морское дно. Литодинамика грунтов, в целом, малоактивная	Большая часть дна занята суглинистыми илами небольшой мощности, локально мощность может возрастать до 15 м. Обычно подстилаются глинами и суглинками неоплейстоцено. Встречается грубообломочный материал ледового разноса	Асейсмичная зона	ММП либо отсутствуют, либо локально представлены сезонными образованиями. Отмечаются многочисленные проявления слабо интенсивных гравитационных процессов	
Северо-Баренцево-морский район (1-A-4)	Аккумулятивно-денудационная интенсивно расчлененная существенно моренная равнина с желобами и расчлененными склонами крутизной более 10°. Оползневые врезы и аккумулятивные тела. Глубины 200–300 м	Глубоководная гидродинамическая зона. Течениевое воздействие на морское дно и переменная подвижность донных осадков	Маломощная толща современных нефелюидных грунтов, перекрывающая пачку связных тонкодисперсных грунтов, часто опесчаненных, отдельные прослои песков с гравием и щебнем. Отдельные гряды, сложенные плотными суглинками и супесями с включением грубообломочного материала	Возможна повышенная сейсмичность на стыке тектонических структур и в желобах	Возможно появление новообразованных ММП. Солифлюкционные и абразионно-солифлюкционные потоки на грядовом рельефе. Оползневые явления	

Таблица 2. Продолжение

Инженерно-геологические районы	Типовые характеристики районов				Мерзотно-динамические и другие опасные природные процессы
	Геоморфологические особенности	Гидролитодинамические процессы	Литология поверхностных отложений и типы грунтов	Сейсмические и неотектонические явления	
Печорский район (1-А-5)	Денудационно-аккумулятивная прибрежная равнина с отдельными желобами, холмами, грядами и уступами Склоны крутизной до 5° и более. Глубины до 150 м	Прибрежная гидродинамическая зона с определяющим волновым воздействием и высокой подвижностью осадков. Интенсивные ресуспензионные процессы под влиянием приливо-отливных течений. В желобах – нефелюидная седиментация. Вдольбереговые потоки наносов. На отдельных участках возможны высокие скорости отступания береговой линии	Современный нестабильный покров донных осадков мощностью до 10 м (обычно первые метры), представленный неустойчивыми грунтами, на мелководьях активно перемещающимися по морскому дну	Возможна повышенная сейсмичность на стыке тектонических структур, в желобах, а также вдоль региональных разломов	Возможна реликтовая мерзлота и ископаемые льды. Постоянные солифлюкционные и абразионно солифлюкционные потоки. В береговой зоне – активная термоабразия. Нестабильный рельеф в зоне выносов р. Печоры (подвижные подводные косы)
Район Центрально-Баренцево-морского поднятия (1-А-6)	Субгоризонтальные плато и возвышенности с отдельными уступами и склонами крутизной до 5°–8°. Глубины 50–200 м	Сочетание течения морского воздействия на морское дно с нефелюидной седиментацией. Умеренная подвижность донных осадков	Большая часть поверхности дна занята суглинками и супесями или супесями небольшой мощности. Широко развиты грунты перлювального генезиса, представленные супесями и суглинками с включением грубообломочного материала, в том числе и ледового разнота	Асейсмичная зона	Мерзлота, в том числе и сезонная, большей частью отсутствует
Приновоземельский район (1-А-7)	Денудационно-структурная равнина на палеозойском цоколе с мелкогрядовой поверхностью и склонами с углами 5°–10° и выше. Глубины 25–150 м	Переходная гидродинамическая зона с сочетанием волновых и течениевых воздействий на морское дно и умеренной подвижностью донных осадков	Преобладают песчаные и супесчаные грунты часто с включением большого количества щебня и мелких валунов. Содержат большое количество дробленной ракушки. Перекрывают суглинки и глины неоплейстоценового возраста или непосредственно выходы скальных пород	Слабо проявленная сейсмичность, связанная с основными вдольбереговыми действующими разрывными нарушениями	Возможно присутствие ММП, представленных либо переохлажденными грунтами, либо новообразованными. На внешнем склоне с большими углами наклона развитые получают склоновые процессы

Таблица 2. Продолжение

Инженерно-геологические районы	Типовые характеристики районов				Мерзлотно-динамические и другие опасные природные процессы
	Геоморфологические особенности	Гидролитодинамические процессы	Литология поверхностных отложений и типы грунтов	Сейсмические и неотектонические явления	
Район крайнего поднятия Земли Франца-Иосифа (1-А-8)	Денудационная равнина с большим диапазоном изменения глубин от островного мелководья до 200 и более метров. Интенсивно пересеченный (грядовый) рельеф дна и изрезанная береговая линия островных архипелагов. Ледовые берега, простирающиеся за пределы берегового склона	Зона с активными разнонаправленными потоками наносов. Следы ледового выпавания и разноса крупнообломочного материала	Тонкий слой песчано-глинистого перлювия, перекрывающий толщу со сложным чередованием плотных моренных суглинков, плотных глин и коренных пород	Значительные по амплитуде и протяженности разрывные нарушения. Слабая сейсмическая активность и редкие землетрясения силой свыше 3 баллов	Возможны реликтовые и новообразованные ММП. Активная экзарационная деятельность айсбергов
Район желоба Франц-Виктории (1-А-9)	Аккумулятивная нефелюидная равнина в желобе с расчлененными склонами бортов крутизной свыше 10°. Активные склоновые процессы. Оползневые врезы. Глубины 100—500 м	Глубоководная гидродинамическая зона. Сочетание нефелюидной седиментации с течением воздействием на морское дно и перемной подвижностью осадков	Мощная толща современных нефелюидных осадков залегает на коричневых, серых, синих илах желобов	Возможна повышенная сейсмичность на стыке тектонических структур и в желобах	ММП практически отсутствуют. Постоянные солифлюкционные и абразионно-солифлюкционные потоки. Активные склоновые процессы
Карская ИГО					
Район центральной Карской равнины (1-Б-1)	Денудационно-аккумулятивная слабосхолмленная равнина. Отдельные холмы, гряды и уступы. Большое количество палеорусел. Глубины 25—100 м	Слабо проявленная волновая деятельность и активное воздействие на дно течений, приводящие к высокой подвижности осадков. Ресурсы осадков под влиянием приливов-отливных течений. Вдоль береговые потоки наносов. На отдельных участках возможны высокие скорости перемещения наносов	Современный нестабильный покров донных осадков мощностью до 10 м, (обычно первые метры), представленный неустойчивыми грунтами, активно перемещающимися по морскому дну	Асейсмичная зона	Подводные реликтовые и новообразованные ММП. Термоабразия и термоэрозия морского дна. Образование гидролаколлитов. Газовые выбросы. Ледовое выпавание. Возможна ослабленность волновых процессов из-за высокой ледовитости моря и широкой полосы припая

Таблица 2. Продолжение

Инженерно-геологические районы	Типовые характеристики районов				Мерзотно-динамические и другие опасные природные процессы
	Геоморфологические особенности	Гидролитодинамические процессы	Литология поверхностных отложений и типы грунтов	Сейсмические и неотектонические явления	
Ямало-Обский район (1-Б-2)	Аккумулятивная аллювиально-морская и морская равнина, прилегающая к термоабразионным берегам. Отдельные ложбины, гряды и уступы. Глубины 25–100 м	Слабопроявленная волновая деятельность и активное воздействие на дно течений, приводящие к высокой подвижности осадков. Ресурсы осадков под влиянием приливно-отливных течений. Вдоль береговые потоки наносов. На отдельных участках возможны высокие скорости перемещения наносов	Современный нестабильный покров донных осадков мощностью до 10 м, (обычно первые метры), представленный неустойчивыми связными тонкодисперсными и несвязными грунтами (песками, супесями, суглинками и илами)	Асейсмичная зона	Подводные реликтовые и новообразованные ММП. Термоабразия и термоэрозия морского дна, а также активное воздействие льдов на окружающие берега. Газовые выбросы. Ледовое выплывание. Возможна ослабленность волновых процессов из-за высокой ледовитости моря и широкой полосы припая
Районы шельфовых краевых желобов (1-Б-3)	Фрагменты аккумулятивных нефелюидных равнин в пределах дна желобов. В желобах расчлененные склоны крутизной свыше 10°. Глубины 100–700 м	Глубоководная гидродинамическая зона. Сочетание нефелюидной седиментации с течением воздействием на морское дно и перемещением осадков	Мощная толща современных нефелюидных осадков залегает на коричневых, серых, синих илах, реже на суглинках и супесях	Возможна повышенная сейсмичность на стыке тектонических структур и в желобах	ММП практически отсутствуют. Солифлюкционные и абразионно-солифлюкционные потоки на склонах желобов.
Район северной Карской равнины (1-Б-4)	Денудационно-аккумулятивная холмисто-грядовая равнина с широким диапазоном изменения глубин от островного мелководья до глубин 100 и более метров. Изрезанная береговая линия островных архипелагов с частичным развитием ледовых берегов	Зона с активными разнонаправленными потоками наносов	Сложное чередование плотных моренных суглинков, плотных глин и лопальных полей глинистых илов, приуроченных к шельфовым ложбинам. Широкое распространение перлювиальных осадков суглинисто-песчаного состава с включением щебнистых и гравийных обломков	Слабая сейсмическая активность и редкие землетрясения силой свыше 3 баллов	Возможны реликтовые и новообразованные ММП. Вероятны процессы ледового выплывания дна, а также гравитационные процессы на склонах

Таблица 2. Продолжение

Инженерно-геологические районы	Типовые характеристики районов				Мерзотно-динамические и другие опасные природные процессы
	Геоморфологические особенности	Гидролитодинамические процессы	Литология поверхностных отложений и типы грунтов	Сейсмические и неотектонические явления	
Район Центрально-Карской возвышенности (I-B-5)	Субгоризонтальное приподнятое плато с грядами холмистой поверхностью со склонами крутизной до 5°–8°. Глубины 50–100 м	Преимущественное воздействие слабых течений на морское дно, осложненное ледовым выпадением. Умеренная подвижность донных осадков	Поверхность дна покрыта опесчаненными илами небольшой мощности, чередующимися с перлювиальными гравийно-песчанистыми грунтами. Встречается грубообломочный материал ледового разноса. Ниже – глинистые осадки неоплейстоцена	В целом асейсмичная зона район	Возможна реликтовые и новообразованные МПП. На склонах – гравитационные процессы, в том числе оплывание осадков
Транзитный район (I-B-6)	Наклонная равнина, рассеянная узкими желобами привершинных частей каньонов. Глубины 100–200 м	Совместное воздействие контурных (вдоль бровки шельфа) и стоковых течений, приуроченных к желобам каньонов. Интенсивное перемещение водно-зерновых потоков по каньонам	Песчаные и пылеватые грунты часто с типичной градиционной слоистостью. Вдоль бровки шельфа развиты перлювиальные гравийно-песчанистые грунты с грубообломочным материалом ледового разноса	Слабая сейсмическая активность	ММП практически отсутствуют. Постоянные солифлюкционные и абразионно-солифлюкционные потоки. В желобах – турбидитные водно-зерновые потоки. На склонах оползневые явления
Восточно-Новоземельский район (I-B-7)	Аккумулятивная наклонная нефелодная равнина, в желобе с расчлененными склонами крутизной свыше 10°. Оползневые врезы. Глубины 100–400 м	Сложное сочетание слабых придонных течений и активное поступление обломочного тонкодисперсного материала со склонов	Преобладают суглинистые илы в осевой части ложбины и суглинистые супеси на бортах желоба. Фиксируются гравитационные отложения, связанные с желобами стока	Проявлена слабая сейсмичность	Возможна реликтовая и новообразованная мерзлота, активные склоновые процессы по бортам желоба
Районы локальных впадин (II-A-1)	Фрагменты аккумулятивных нефелодных равнин в полоних депрессиях. Углы склонов – пологие, менее 3°. Глубины 20–90 м	Сложное сочетание воздействия на морское дно слабых течений, ослабленных волновыми процессами в условиях длительно существующего ледового покрова	Преимущественно глинистые и песчанистые илы мощностью 3–7 м. Ниже уплотненные глины позднеооплейстоцена	Активная сейсмичность, четко связанная с линиями разломов (интенсивностью до 6 баллов)	Возможно присутствие ММП и ископаемых льдов

Таблица 2. Продолжение

Инженерно-геологические районы	Типовые характеристики районов				Мерзлотно-динамические и другие опасные природные процессы
	Геоморфологические особенности	Гидролитодинамические процессы	Литология поверхностных отложений и типы грунтов	Сейсмические и неотектонические явления	
Район плоского просторного пространства мерзлых пород (II-A-2)	Денудационно-солифлюкционная плоская равнина, сложенная мерзлыми породами, перекрытая относительно маломощным слоем оттаявших илов. Глубины 20–90 м	Сочетание воздействия на морское дно волновых, течениявых процессов и растелления морского дна. Литодинамическая активность понижена из-за длительно существующего ледового покрова	Песчаные илы и глинистые пески, иногда с включениями щебня и гравия мощностью до 1 м, подстилаемые мерзлыми плотными породами	Проявлена сейсмичность, четко связанная с линиями разломов (интенсивностью до 6 баллов)	Широко распространены реликтовые ММП и ископаемые льды значительной мощности. Солифлюкционные явления и скопления газов. Слабо изученные проявления повышенных тепловых потоков. Широко проявлены процессы ледового выпахивания
Район Ленской равнины (II-A-3)	Аккумулятивно-денудационная равнина с многочисленными палеодолинами и каньонами вблизи бровки континентального склона	Осадки формируются под определяющим воздействием придонных течений, приводящих к высокой подвижности осадков и частой ресупензии донных осадков. Активные вдольбереговые потоки наносов. Отмечается активное отступление береговой линии	Современный нестабильный покров донных осадков (преимущественно илов, реже песков) мощностью менее 4 м (обычно первые метры). Представлен неустойчивыми грунтами, активно перемещающимися по морскому дну	Проявлена сейсмичность, четко связанная с линиями разломов (интенсивностью до 6 баллов)	Возможно присутствие реликтовых ММП и ископаемых льдов. В зоне бровки шельфа возможно проявление гравитационных процессов
Районы прибрежных эстуариев (II-A-4)	Фрагменты прибрежных плоских аккумулятивных аллювиально-морских равнин с четко выраженными палеодолинами. Глубины до 25 м	Активное воздействие на морское дно приливно-отливных и стоковых (речных) течений при активном перемещении донных наносов	Пески и связанные грунты, часто органические и загорфованные	Возможно проявление сейсмических процессов	Возможно наличие реликтовых ММП, которые в летний период частично оттаивают и деградируют. Представляет опасность заносимость фарватеров и инженерных объектов на дне. В весенне-летний период активное проявление ледового выпахивания

Таблица 2. Продолжение

Инженерно-геологические районы	Типовые характеристики районов				Мерзотно-динамические и другие опасные природные процессы
	Геоморфологические особенности	Гидролитодинамические процессы	Литология поверхностных отложений и типы грунтов	Сейсмические и неотектонические явления	
Восточносибирско-Чукотская ИГО					
Район Восточно-Сибироморско-Чукотской мористой равнины (II-B-1)	Аккумулятивная нефелюидная плоская равнина, с хорошо выраженными палеодолинами и пологими желобами со склонами крутизной менее 5°. Оползневые врезы. Глубины 50–160 м	Нефелюидная седиментация в условиях интенсивного речного выноса и низкой гидродинамической активности в условиях длительно существующего ледового покрова. Главный фактор — очень медленные придонные течения. Ресуспензия осадков только в короткий летний период	Илы залегают на плотных глинах или песках неоплейстоцена. Фацциально замещаются относительно прочными мерзлыми породами, неустойчивыми в условиях растепления	Возможна повышенная сейсмичность на стыке тектонических структур и в желобах	Возможны реликтовые ММП и ископаемые льды значительной мощности, частично протаивающие в короткий летний период. Постоянные солифлюкционные и абразионно-солифлюкционные потоки
Район Восточно-Сибироморско-Чукотской прибрежной равнины (современной и затопленной) (II-B-2)	Денудационно-аккумулятивная выровненная прибрежная равнина с постоянно меняющимся рельефом дна. Отдельные изометричные и грядовые поднятия с очень пологими склонами. Местами поверхность дна осложнена мегарифелями. Глубины 10–100 м	Прибрежная гидродинамическая зона с определяющим волновым воздействием и высокой подвижностью осадков. Постоянная ресуспензия донных осадков под влиянием придонных течений. Активные вдольбереговые потоки наносов. Возможны высокие скорости отступления береговой линии. В течение сезона литодинамическая активность различна из-за длительного ледового покрова	Прерывистый покров суглинистых илов, активно перемещающихся по морскому дну. Мощность до 5 м. Перекрывают плотные глинистые и песчаные грунты	Возможна повышенная сейсмичность на стыке тектонических мегаструктур	Преимущественно реликтовые ММП. Термоабразия и термоэрозия. Образование гидролакколитов. Газовые выбросы. Ледовое выпыхивание

Таблица 2. Продолжение

Инженерно-геологические районы	Типовые характеристики районов				Сейсмические и неотектонические явления	Мерзотно-динамические и другие опасные природные процессы
	Геоморфологические особенности	Гидролитодинамические процессы	Литология поверхностных отложений и типы грунтов	Литология поверхностных отложений и типы грунтов		
Район Центральные Чукотских поднятий (о-ва Врангель и Геральд) (II-Б-3)	Денудационные плато с глущинами от островного мелководья до 80 и более метров. Наличие крутых склонов с уклонами до 5°–10°	Активная гидродинамическая зона с преобладанием процессов размыва и разнонаправленными потоками наносов. Существенное влияние оказывает ледовый разнос крупнообломочного материала. Активная абразия берегов	Преобладает широкий спектр осадков, представленных песчаными, песчано-гравийными и песчано-глинистыми грунтами перлювиального генезиса мощностью до 1 м с отдельными выходами скальных пород. Перекрывают плотные глинистые, в том числе скальные грунты	Преобладает широкий спектр осадков, представленных песчаными, песчано-гравийными и песчано-глинистыми грунтами перлювиального генезиса мощностью до 1 м с отдельными выходами скальных пород. Перекрывают плотные глинистые, в том числе скальные грунты	Значительные по амплитуде и протяженности разрывные нарушения. Слабая сейсмическая активность и редкие землетрясения силой свыше 3 баллов	Возможны реликтовые ММП в зонах локального распространения рыхлых осадков. Активная абразия берегов. Гравитационные явления на склонах
Транзитный район (II-Б-4)	Наклонная равнина, рассеянная узкими желобами каньонов. Глубины 80–150 м	Преобладающее влияние стоковых течений, приуроченных к желобам каньонов, а также контурные течения вдоль бровки континентального склона. Интенсивное перемещение зерновых потоков по каньонам	Чередование песчаных грунтов незначительной мощности с перлювиальными образованиями, представленными песками различной зернистости с включением грубообломочного материала, покрывающие морское дно между каньонами. Подстилаются плотными глинистыми породами неоплейстоцена	Чередование песчаных грунтов незначительной мощности с перлювиальными образованиями, представленными песками различной зернистости с включением грубообломочного материала, покрывающие морское дно между каньонами. Подстилаются плотными глинистыми породами неоплейстоцена	Слабая сейсмическая активность	ММП практически отсутствуют. Постоянные солифлюкционные и абразионно-солифлюкционные потоки. Оползневые явления
Район Чукотской прибрежной равнины (II-Б-5)	Слабонаклонная аккумулятивная равнина на глубинах 0–20 м. Лагунный тип берега	Интенсивное волновое воздействие с образованием вдольбереговых потоков наносов. Нефелюидная и волновая седиментация в лагунах. Активное перемещение наносов. Местами термоабразионное разрушение берегов	Преобладают песчаные осадки мощностью от 1 до 10 м. В лагунах илы и песчано-глинистые грунты	Преобладают песчаные осадки мощностью от 1 до 10 м. В лагунах илы и песчано-глинистые грунты	Слабая сейсмическая активность	ММП практически отсутствуют в результате деградации и активной литодинамики в зоне волнового воздействия. Отмечается сезонное промерзание грунтов у берегов. Аккумулятивно-денудационные процессы в береговой зоне при активном участии припайных льдов

Таблица 2. Окончание

Инженерно-геологические районы	Типовые характеристики районов				Мерзотно-динамические и другие опасные природные процессы
	Геоморфологические особенности	Гидролитодинамические процессы	Литология поверхностных отложений и типы грунтов	Сейсмические и неотектонические явления	
Районы прибрежных эстуариев (II-Б-6)	Фрагменты прибрежной плоской аккумулятивной аллювиально-морская равнины в пределах бухт и эстуарных заливов. Фиксируются палеодолины погребенные и, реже, выраженные в рельефе. Глубины 10–25 м	Сочетание зон активного воздействия на морское дно стоковых течений при активном перемещении донных наносов и нефелоидной седиментации в стороне от литодинамических потоков	Супесчаные и песчаные несвязные и связные грунты с большим количеством органики мощностью до 10 м	Возможно проявление сейсмических процессов	Мерзлотные проявления в грунтах имеют сезонный характер
Районы склоновых открытых палеодолин (II-Б-7)	Наклонные денудационные равнины на склонах палеодолин, пересекающих внутреннюю часть шельфа. Глубины 20–50 м	Режим нулевого осадко-накопления в условиях повышенной подвижности вод. Склоновые процессы. Широкое развитие перелювия	Супесчаные и суглинистые грунты мощностью до 1–3 м, перекрывающие плотные глины неоплейстоцена	Практическое отсутствие сейсмической опасности	Мерзлотные проявления в грунтах имеют сезонный характер. Склоновые процессы

кровных отложений, т.е. развивающимся преимущественно по аккумулятивному сценарию;

– коричневатая гамма оттенков – районам, где преобладает неустойчивая и изменчивая по пространству и по времени инженерно-геологическая обстановка, определяемая развитием процессов аккумуляции и денудации, вплоть до размыва;

– более интенсивные голубоватые и голубовато-зеленые тона – районам с переходной инженерно-геологической обстановкой, определяемой господством смешанных аккумулятивно-денудационных процессов, сильно изменчивых по пространству и по времени.

Косой штриховкой отмечены районы с нестабильной инженерно-геологической обстановкой, определяемой процессами размыва коренной ложа и переноса донных отложений в виде турбидных потоков. При этом, исходя из того, что характер указанных процессов специфически проявляется в столь разнородных областях, каждая группа районов получила общую цветовую гамму, но различный оттенок в соответствии с ее принадлежностью к определенной инженерно-геологической области.

Например, специфика Баренцевской ИГО (I-A) заключается в том, что нефелоидные осадки здесь локализируются в отдельных впадинах, глубина которых превышает 300 м, а один из основных источников обломочного материала – размыв дна на более мелких участках и переотложение обломочного материала. Следствием этого является супесчаный состав илов и их относительно небольшая мощность. В пределах Восточносибирско-Чукотской ИГО (II-Б) основным поставщиком обломочного материала являются великие сибирские реки на фоне длительно существовавшего ледового покрова, который существенно снижал уровень гидродинамической активности. Поэтому здесь донные осадки существенно пелитовые, причем их накопление может происходить и на глубинах до 100 м, а минеральный состав определяется минеральным составом пород и отложений областей, дренируемых речными потоками на суше.

Описание инженерно-геологических районов приведено в табл. 2, где рассмотрена индивидуальная компонентная характеристика выделенных районов, представленных на картографической схеме. Кроме того, на этой схеме показана дополнительная информация, позволяющая более широко рассматривать инженерно-геологические зональные условия выделенных районов. К ним относятся, прежде всего, зоны проявления опасных эндогенных геологических процессов. Выделены зоны активного и слабого проявления сейсмостектонических процессов, показаны зоны сейсмоактивности по атласу ОСР, а также эпи-

центры основных землетрясений в пределах шельфа силой более 3-х баллов [1]. Также показаны зоны распространения многолетнемерзлых пород и области, где проявления ММП практически отсутствуют. Специальными знаками показаны скопления моренных гряд, речные палеодолыны, районы развития течениявых отложений. Также обозначены бровка шельфа и термоэрозийные берега, наиболее нестабильные и содержащие прямую угрозу инженерным проектам в приморской части берегов (рис. 1, 2).

СХЕМА РАЙОНИРОВАНИЯ КАК ЭФФЕКТИВНОЕ СРЕДСТВО ОБОБЩЕННОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ОЦЕНКИ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ АРКТИЧЕСКОГО ШЕЛЬФА

В результате выбранной цветовой гаммы на самой схеме районирования отчетливо видны отличия, прежде всего, на уровне регионов и областей. Так, Баренцевская ИГО преимущественно занята районами с переходной нестационарной (в широком смысле этого термина) инженерно-геологическая обстановкой, определяемой режимом аккумулятивно-денудационных процессов, сильно изменчивых по пространству и по времени, и во многом связанных с зонами развития ледникового рельефа.

Инженерно-геологические обстановки, связанные с преобладанием процессов денудации, располагаются главным образом вокруг островов, а также они характерны для поднятий южной части района – Мурманской банке. Районы с преобладанием формирования голоценовых нефелитных осадков выделены лишь во впадинах глубже 300 м. Отдельно выделяется район Печорского моря, где преобладают аккумулятивные процессы, как в голоцене, так и в плейстоцене. В целом для области характерно широкое развитие скуринга или ледникового выпахивания, которое длилось практически весь голоцен и отмечается до сих пор на мелководьях.

Аккумулятивно-денудационные равнины характерны и для Карской ИГО. Однако здесь наблюдается иной перепад глубин (хотя преобладают глубины до 100 м), и денудационные участки связаны большей частью с пологими положительными структурами платформенного цоколя. Типичный ледниковый рельеф прослеживается только вдоль восточной бровки Новоземельского желоба и, в существенно меньшей мере, вокруг островов архипелага Северная Земля. Равнины со стабильно развивающимся аккумулятивным покровом развиты более широко, чем в Баренцевской ИГО, и приурочены к днищам желобов, а также к эстуариям рек Оби и Енисея.

Инженерно-геологические районы со стабильным развитием денудационных процессов пользуются в Карской ИГО гораздо меньшим распространением, чем в Баренцевской ИГО, и приурочены они, главным образом, к поднятию острова Визе, располагающемуся между желобами Святой Анны и Воронина. Для этой области характерно появление мерзлых пород и ископаемых, а также новообразованных льдов в донных отложениях. Это делает более опасной эксплуатацию скважин и буровых платформ, чем в Баренцевской инженерно-геологической области.

В Байдарацкой губе широко представлены процессы выпахивания дна стамухами. На крайнем северо-востоке Карской ИГО выделена зона транзитной аккумуляции, представленной водно-зерновыми потоковыми отложениями, приуроченными к верхней части каньонов континентального склона.

Лаптевская ИГО является, с одной стороны, переходной от Западно-Арктического региона к Восточно-Арктическому. С другой стороны, она имеет свои оригинальные черты, которые подтверждают закономерность ее выделения. Здесь, как и в областях Западно-Арктического шельфа, пространственно преобладают переходные инженерно-геологические обстановки, определяемые развитием аккумулятивно-денудационных процессов, сильно изменчивых по пространству и по времени. На глубинах до 20 м преобладают тонкозернистые разности осадков вплоть до типичных илов. Это связано с широким и долгим существованием ледового покрова, который существенно снижает уровень интенсивности гидро-литодинамических процессов. Широко проявляют себя процессы размыва, причем они происходят как у берегов, так и в открытой части моря. В качестве объектов размыва здесь выступают мерзлые тонкозернистые плейстоценовые породы, так называемой, “едомной” толщи.

Гравитационные процессы протекают в виде солифлюкционных потоков, которые формируются при оттаивании поверхностного слоя осадков на морском дне и “стекании” тонкозернистых водно-зерновых потоков по пологим склонам поднятий. Наличие мерзлых пород и даже предполагаемых ископаемых льдов существенно затрудняет проектирование любых инженерных объектов и требует проведения детальных инженерно-геологических изысканий. Другой отличительный признак этой области – наличие активных сейсмотектонических явлений.

Рассматриваемая область является продолжением зоны рифтинга в Северном Ледовитом океане, которая на протяжении четвертичного периода раскрывается в сторону дельты реки Лены и далее – Верхоянского хребта. Здесь зафиксировано множество сейсмических толчков, а предпола-

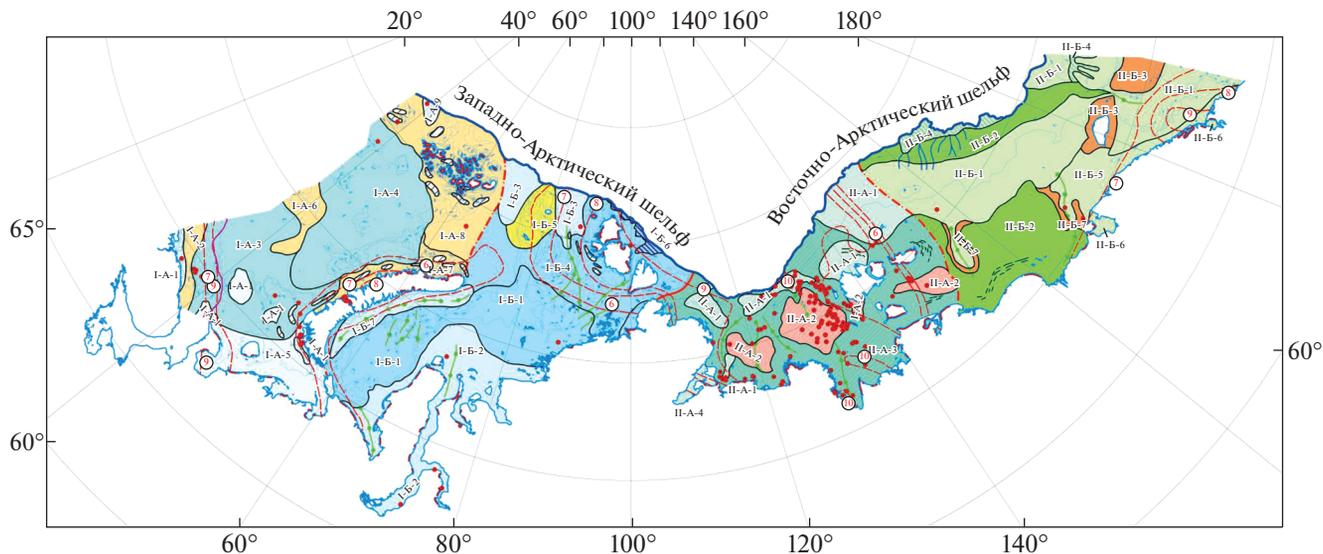


Рис. 1. Макет схемы инженерно-геологического районирования Арктического шельфа России (масштаб 1 : 15 000 000).

Условные обозначения

- Интенсивность проявления опасных эндогенных геологических процессов
- Проявление сейсмологических процессов: а - активное, б - слабое
 - Границы зон сейсмоактивности по ОСР, баллы MSK-64, по СП 2016
 - Эпицентры землетрясений с магнитудой более 3 баллов
- Границы инженерно-геологических подразделений
- Между инженерно-геологическим регионами
 - Между инженерно-геологическим регионами
 - Между инженерно-геологическим регионами
- Прочие обозначения
- Границы криолитозоны
 - Термоабразионные изменения береговой линии
 - Моренные гряды
 - Реликтовые долины
 - Зона течениевых отложений
 - Каньоны
 - Бровка шельфа
 - Береговая линия
 - Изобаты

Инженерно-геологические районы (ИГР)	Западно-Арктический (I)							Восточно-Арктический (II)							
	Баренцевская (I-A)			Карская (I-B)				Лаптеворская (II-B)		Восточно-Сибирско-Чукотская (II-B)					
	1 тип	2 тип	3 тип	1 тип	2 тип	3 тип	4 тип	1 тип	2 тип	3 тип	4 тип	1 тип	2 тип	3 тип	4 тип
Локальные впадины и желоба	Южно-Мурманский I-A-3	Южно-Баренцевоморский I-A-2	Язько-Обский I-B-2	Шельфовые красные желоба I-B-1	Центральная Карская I-B-5	Транзитный I-B-3	Локальные впадины I-A-1	Литтеская равнина II-A-3	Плошадного распространения мерзлых пород II-A-2	Восточно-сибирская Чукотская равнина II-B-1	Восточно-сибирская Чукотская равнина II-B-2	Центральные Чукотские плато II-B-3	Транзитные районы II-B-4		
Печорский I-A-5	Спиро-Баренцевоморский I-A-4	Центрально-Баренцевоморские плато I-A-6	Шельфовые красные желоба I-B-3	Шельфовые красные желоба I-B-4			Эстурии II-A-4			Чукотская прибрежная равнина II-B-5		Палоскльоны II-B-7			
Желоб Франца-Виктории I-A-9		Привокзальный желоб I-A-7	Восточно-Новоземельский желоб I-B-7							Эстурии II-B-6					
		Красное плато Ледя Франца-Исидора I-A-8													

Рис. 2. Условные обозначения к схеме инженерно-геологического районирования Арктического шельфа России.

гаемая интенсивность землетрясений может превышать 8 баллов. Еще одной геологической опасностью является широкое развитие термоабразии берегов. Имеются представления, что в открытом море уничтожены целые острова, а на месте их бывшего существования в настоящее время развиты только выровненные денудационные площадки на глубинах 1–20 м. Техногенное вмешательство человека может только интенсифицировать этот процесс.

Восточносибирско-Чукотская ИГО охватывает акваторию двух морей – Восточносибирского и Чукотского и может смело относиться к числу наименее изученных. Здесь широким распространением пользуются аккумулятивные равнины, в инженерно-геологическом отношении характеризующиеся относительно стабильной инженерно-геологической обстановкой, определяемой накоплением мощных покровных отложений. Эта зона характерна для средней части шельфа, а также за-

нимает большую часть Чукотского моря и опущенные участки шельфа, вблизи бровки шельфа. Инженерно-геологические обстановки с чередованием аккумулятивных и денудационных процессов протягиваются прямо из Лаптевской ИГО. При этом в прибрежной зоне, на мелководье, покрытом песками, выявлены сильные придонные течения, которые обуславливают появление зон транзитной аккумуляции в виде мегарифелей и гряд, сложенных песчаными отложениями. Особенности этой области является наличие структурных поднятий, которые увенчаны островами Врангеля и Геральда, а также наличие широких палеодолин, прямо продолжающих русла крупных сибирских рек. Вся прибрежная зона имеет четко выраженный лагунный характер. Кроме того, как в Чукотском, так и в Восточно-Сибирском морях, пришельфовая часть имеет ступенчатый характер, а на крутых склонах, разделяющих верхнюю и нижнюю ступени рельефа, развиты каньоны, в которых действуют постоянные водно-зерновые потоки, формирующие турбидиты. Так как все эти признаки большей частью характерны для всей описываемой подводной территории, то и разделить ее в настоящее время не представляется возможным. Отсюда и ее сложное название данной, включающее название двух морей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненное инженерно-геологическое районирование Арктического шельфа России позволило, несмотря на ограниченную информацию, провести комплексный анализ условий формирования инженерно-геологических условий, провести индивидуализацию и типизацию выделенных районов, дать развращенную характеристику выделенных районов, указав главные геологические опасности для строительства и производства инженерных работ на шельфе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Аветисов Г. П.* Сейсмогенные зоны Арктики. СПб: Изд-во ВНИИОГ, 1996. 183 с.

2. *Аксенов А.А., Дунаев Н.Н., Ионин А.С. и др.* Арктический шельф Евразии в позднечетвертичное время. М.: Наука, 1987. 277 с.
3. *Виноградов В.А., Горячев Ю.В., Гусев Е.А.* 2010. Сквозные структурные зоны шельф-океан Восточной Арктики // Геолого-геофизические характеристики литосферы Арктического региона. Вып. 7. Тр. ВНИИОкеангеология. Т. 210. С. 32–47.
4. *Захаров М.С., Кобзев А.Г.* Картографический метод и геоинформационные системы в инженерной геологии. Учебное пособие. 2-е изд. СПб.: 2019. 116 с.
5. Инженерная геология СССР. Т. 1 / Под ред. И. С. Комарова, 1978. М.: Изд. МГУ, 528 с.
6. Инженерная геология СССР. Шельфы СССР / Под ред. К.И. Джангжавы, И.С. Комарова, Я.В. Неизвестнова и др., 1990. М.: Недра, 239 с.
7. Карта рельефа дна Северного Ледовитого океана, Масштаб 1 : 5 000 000 (проекция стереографическая). СПб.: ГУНиО МО, ВНИИОкеангеология, РАН. 1998.
8. *Матишов Г.Г.* Дно океана в ледниковый период. Л.: Наука, 1984. 176 с.
9. *Миронюк С.Г.* Учет палеогеографических условий при выполнении инженерных изысканий на шельфе западного сектора Российской Арктики. / Инженерные изыскания. 2015. № 7. С. 28–38
10. *Миронюк С.Г., Иванова А.А.* Микро- и мезорельеф гляциального шельфа Баренцева и Карского морей в свете новых данных // Бюллетень комиссии по изучению четвертичного периода. 2018. № 76. С. 41–58.
11. *Нарышкин Г.Д.* Рельеф дна Арктического бассейна: автореф. дисс. ... док. географ. наук. М.: ВНИИОкеангеология, 2001. 47 с.
12. *Павлидис Ю.А., Ионин А.С., Шербаков Ф.А.* Арктический шельф. Позднечетвертичная история как основа прогноза развития. М.: ГЕОС. 1998. 184 с.
13. *Попов И.В., Кац Р.С., Кориюковская А.К., Лазарева В.П.* Методика составления инженерно-геологических карт. М.: Изд. геол. литературы, 1950. 45 с.
14. *Попов И.В.* Инженерная геология СССР. Ч. 1: Общие основы региональной инженерной геологии. М.: Изд. МГУ, 1961. 178 с.

ENGINEERING GEOLOGICAL ZONING OF THE RUSSIAN ARCTIC SHELF

A. E. Rybalko^{a,b,c,#}, M. S. Zakharov^{a,##}, V. A. Shcherbakov^{a,###}, and A. V. Loktev^{a,c,####}

^a *Gramberg All-Russian Research Institute of Geology and Mineral Resources of the World Ocean (FSBI "VNIIOkeangeologia"), Angliyskiy pr. 1, St. Petersburg, 190121 Russia*

^b *Institute of Earth Sciences, St. Petersburg State University V.O. 10th line 31–33, St. Petersburg, 190000 Russia*

^c *Center for Marine Research, Lomonosov Moscow State University Lenininskie Gory 1, bld. 77, Moscow, 119992 Russia*

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

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

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

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

This paper reviews methodical principles of engineering geological zoning and scale taxonomic units of zoning, analyzes the main factors determining the engineering geological environment in various parts of the Arctic shelf, presents a schematic map of engineering geological zoning of the Russian Arctic shelf on scale 1 : 15 000 000. The generalizing characteristics of engineering geological condition within the selected areas are given.

Keywords: *engineering geological zoning, Arctic shelf, engineering geological region, area, district, historical and genetic justification of zoning, taxonomy and typology of engineering geological conditions*

REFERENCES

1. Avetisov, G.P. *Seismogennye zony Arktiki* [Seismogenic zones in the Arctic]. St. Petersburg, VNIIOG Publ., 183 p. (in Russian)
2. Aksenov, A.A., Dunaev, N.N., Ionin, A.S. et al. *Arkticheskii shel'f Evrazii v pozdnechetvertichnoe vremya* [The Arctic shelf of Eurasia in the late Quaternary]. Moscow, Nauka Publ., 1987, 277 p. (in Russian)
3. Vinogradov, V. A., Goryachev, Yu. V., Gusev, E.A. *Skvoznye strukturnye zony shel'f-ocean Vostochnoi Arktiki* [Through structural zones of the shelf-ocean of the Eastern Arctic]. Geological and geophysical characteristics of the Arctic region lithosphere. Proc. VNIIOkeangeologiya, 2010. Iss. 7. V. 210. P. 32-47 (in Russian)
4. Zakharov, M. S., Kobzev, A. G. *Kartograficheskii metod i geoinformatsionnye sistemy v inzhenernoi geologii* [Cartographic method and geographic information systems in engineering geology]. St. Petersburg, 2019, 116 p. (in Russian)
5. *Inzhenernaya geologiya SSSR. T.1* [Engineering geology of the USSR. Volume 1]. Komarov, I.S., Ed., Moscow, MGU Publ., 1978, 528 p. (in Russian)
6. *Inzhenernaya geologiya SSSR. Shel'fy SSSR* [Engineering geology of the USSR. Shelves]. Dzhandzhgava, K.I., Komarov, I.S., Neisvestnov, Ya.V., Eds. Moscow, Nedra Publ., 1990, 239 p. (in Russian)
7. *Karta rel'efa dna Severnogo Ledovitogo okeana* [Map of the bottom topography of the Arctic Ocean]. Scale 1 : 5 000 000, stereographic projection. St. Petersburg, GUNiO MO, VNIIOkeangeologiya, RAS, 1998. (in Russian)
8. Matishov, G.G. *Dno okeana v lednikovyi period* [Ocean bed in the ice age]. Leningrad: Nauka, 1984, 176 p. (in Russian)
9. Mironyuk, S.G. *Uchet paleogeograficheskikh uslovii pri vypolnenii inzhenernykh izyskaniy na shel'fe zapadnogo sektora Rossiiskoi Arktiki* [Accounting for paleogeographic conditions upon engineering survey on the shelf of the western sector of the Russian Arctic]. *Inzhenernye izyskaniya*, 2015. № 7. P. 25–38 (in Russian)
10. Mironyuk, S. G., Ivanova, A.A. *Mikro- i mezorel'ef glyatsial'nogo shel'fa Barentseva i Karskogo morei v svete novykh dannykh* [Micro- and mesorelief of the glacial shelf of the Barents and Kara Seas in the light of new data]. *Byulleten komissii po izucheniyu chetvertichnogo perioda*, 2018. № 76. P. 41–58 (in Russian)
11. Naryshkin, G.D. *Rel'ef dna Arkticheskogo basseina* [The bottom topography of the Arctic basin]. Extended Abstract of Doctoral (Geogr.) diss. Moscow, VNIIOkeangeologiya, 2001, 47 p. (in Russian)
12. Pavlidis, Yu. A. Ionin, A.S., Shcherbakov, F.A. *Arkticheskii shel'f. Pozdnechetvertichnaya istoriya kak osnova prognoza razvitiya* [Arctic shelf. Late Quaternary history as a basis for development forecast]. Moscow, GEOS, 1998, 184 p. (in Russian)
13. Popov, I.V., Katz, R.S., Korikovskaya, A.K., Lazareva, V.P. *Metodika sostavleniya inzhenerno-geologicheskikh kart* [Method for compiling engineering geological maps.] Moscow, Izd. Geol. Literatury, 1950, 45 p. (in Russian)
14. Popov, I.V. *Inzhenernaya geologiya SSSR. Ch.1: Obshchii osnovy regionalnoy inzhenernoy geologii* [Engineering geology of the USSR. Part 1: General principles of regional engineering geology] Moscow, MGU Publ., 1961, 478 p. (in Russian)

ЗАГРЯЗНЕНИЕ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

УДК 622.7.017

МОБИЛИЗАЦИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИ ОПАСНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ ХВОСТОВ ОБОГАЩЕНИЯ ЛОПАРИТОВЫХ РУД ПОД ДЕЙСТВИЕМ АТМОСФЕРНЫХ ОСАДКОВ

© 2021 г. Е. А. Красавцева^{1,2,*}, Д. В. Макаров^{2,**}, Е. А. Селиванова^{3,***},
В. В. Максимова^{1,2,****}, А. В. Светлов^{2,*****}

¹ Лаборатория природоподобных технологий и техносферной безопасности Арктики
ФИЦ “Кольский научный центр РАН”, ул. Ферсмана, 14, Апатиты, 184209 Россия

² Институт проблем промышленной экологии Севера ФИЦ “Кольский научный центр РАН”
мкр. Академгородок, 14а, Апатиты, 184209 Россия

³ Геологический институт ФИЦ “Кольский научный центр РАН”
мкр. Академгородок, 14, Апатиты, 184209 Россия

*E-mail: e.krasavtseva@ksc.ru

**E-mail: d.makarov@ksc.ru

***E-mail: selivanova@geoksc.apatity.ru

****E-mail: v.maksimova@ksc.ru

*****E-mail: a.svetlov@ksc.ru

Поступила в редакцию 19.01.2021 г.

После доработки 11.02.2021 г.

Принята к публикации 14.02.2021 г.

В лабораторных условиях проведено исследование мобилизации экологически опасных элементов из хвостов обогащения лопаритовых руд под действием атмосферных осадков. Объектом исследования выступали хвосты текущего производства. В регионе сосредоточено значительное число горнорудных предприятий, являющихся источником загрязнения воздушной, водной сред и почв. Одним из приоритетных загрязнителей воздушного бассейна является сернистый газ. Исходя из вышеизложенного, для моделирования химического выветривания хвостов использовались 0.002 N раствор серной кислоты, имитирующий кислотные дожди, и дистиллированная вода в качестве контроля. Под воздействием слабо концентрированного сернокислого раствора наблюдалось многократное увеличение скорости разложения минералов, входящих в состав хвостов. Концентрации тяжелых металлов и фтор- и фосфат-ионов в результирующих растворах по окончании эксперимента при увлажнении исследуемого материала разбавленным раствором серной кислоты во много раз превышали предельно допустимые концентрации для рыбохозяйственных водоемов. Отмечен интенсивный переход в раствор редкоземельных элементов легкой группы (La–Sm). Вероятность и интенсивность кислотных дождей должны приниматься во внимание при экологической оценке опасности хвостов обогащения лопаритовых руд для окружающей среды.

Ключевые слова: хвосты обогащения, миграция, экологическая опасность, тяжелые металлы, редкоземельные элементы

DOI: 10.31857/S0869780921030036

ВВЕДЕНИЕ

Разработка месторождений полезных ископаемых связана с образованием большого количества отходов – вскрышные и проходческие породы, хвосты обогащения и т.д. В Мурманской обл., где сосредоточен ряд крупных горнодобывающих предприятий, ежегодно складировается свыше 200 млн т горнопромышленных отходов [3]. Единственное в России горнорудное предприятие, разрабатывающее месторождение лопаритовых руд, расположено на Кольском полуострове.

За многолетнюю деятельность в его хвостохранилищах накопилось огромное количество отходов, остающихся после извлечения лопарита, – около 6.5 млн т на первом поле хвостохранилища, свыше 11 млн т – на втором действующем поле [2, 10]. Ежегодный прирост хвостов составляет около 440 тыс. т.

Дезинтегрированный материал хвостов обогащения при хранении подвергается широкому спектру гипергенных преобразований вследствие взаимодействия с атмосферой, дождевыми вода-

Таблица 1. Минеральный состав хвостов обогащения лопаритовых руд текущего производства*

Минерал	Содержание, %
Нефелин $(\text{Na}, \text{K})\text{AlSiO}_4$	62.22
Полевой шпат $(\text{Na}, \text{K})\text{AlSi}_3\text{O}_8$	16.51
Апатит $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH}, \text{F}, \text{Cl})_2$	1.03
Лопарит $(\text{Na}, \text{Ce}, \text{Ca}, \text{Sr}, \text{Th})(\text{Ti}, \text{Nb}, \text{Fe})\text{O}_3$	0.98
Эгирин $\text{NaFe}^{3+}(\text{Si}_2\text{O}_6)$	18.71
Диопсид $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$	0.04
Содалит $\text{Na}_4\text{Si}_3\text{Al}_3\text{O}_{12}\text{Cl}$	0.17
Ломоносовит $\text{Na}_{10}\text{Ti}_4(\text{Si}_2\text{O}_7)_2(\text{PO}_4)_2\text{O}_4$	0.19
Лампрофиллит $(\text{Sr}, \text{Ba})_2(\text{Na}, \text{Ti})_4\text{Ti}_2\text{O}(\text{Si}_2\text{O}_7)_2(\text{O}, \text{OH}, \text{F})_2$	0.15
Сумма	100.00

*Выполнен в ОАО “Кольский геолого-информационный аналитический центр”.

ми, почвенными растворами. В регионах с высококоразвитой промышленностью выбросы от антропогенных источников загрязнения атмосферы кислотными ангидридами, в частности SO_2 , SO_3 , NO , NO_2 , преобладают над природной эмиссией [8]. При их растворении в дождевой воде образуются кислотные дожди, являющиеся одной из наиболее тяжелых форм загрязнения окружающей среды [4, 16]. Причем влияние кислотных дождей ощущается как в зонах, прилегающих к предприятиям цветной металлургии, так и на значительном удалении от последних. Приоритетные источники загрязнения атмосферы сернистым газом, никелем и медью – комбинаты “Североникель” и “Печенганикель” [5]. В работах [11, 12] показано, что среднемноголетняя зона локального загрязнения как снежного покрова, так и жидких осадков сульфатами расположена на расстоянии до 70 км от центра промышленной площадки в г. Мончегорске.

В ряде работ, посвященных исследованию взаимодействия горнопромышленных отходов с кислотными дождями, растворенным органическим веществом и др., было показано, что внесение агрессивного агента приводит к интенсификации перехода экологически опасных элементов в подвижные формы [6, 13, 18, 21]. Отдельно изучено взаимодействие ряда минералов и горных пород с разбавленными растворами серной кислоты и подкисленной речной водой [14, 15, 17]. Моделированию химического выветривания и исследованию процессов гипергенных преобразований апатито-нефелиновых и медно-никелевых руд были посвящены работы наших коллег [7, 9].

Ранее нами были исследованы пробы хвостов обогащения лопаритовых руд обоих полей, изучено их влияние на рост и развитие высших растений [1, 2]. Однако при геоэкологической оценке риска негативного влияния отходов добычи и переработки руд на окружающую среду необходимо учитывать еще и такое опасное проявление техногенеза, как кислотные дожди [7].

Цель работы – изучение мобилизации экологически опасных элементов из хвостов обогащения лопаритовых руд в модельных условиях, имитирующих кислотные дожди.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Объектом исследования являлись хвосты текущего производства обогатительной фабрики горнорудного предприятия, разрабатывающего месторождение лопаритовых руд. Поскольку ранее была отмечена дифференциация материала хвостов по крупности и вещественному составу уже на стадии складирования [1], работу вели с хвостами, отобранными в феврале 2020 г. непосредственно на фабрике из зумпфа, до разгрузки на хвостохранилище.

Отходы обогащения представляют собой мелкозернистые пески, крупность минеральных частиц составляет 0.01–0.5 мм.

Химический состав хвостов обогащения лопаритовых руд текущего производства, масс. %: SiO_2 – 48.53, TiO_2 – 1.35, Al_2O_3 – 22.40, Fe_2O_3 – 5.12, FeO – 0.66, MnO – 0.25, CaO – 1.42, MgO – 0.38, K_2O – 4.24, Na_2O – 13.43, P_2O_5 – 0.68, SrO – 0.35, F – 0.08, SO_3 – 0.11.

Минеральный состав хвостов обогащения лопаритовых руд текущего производства приведен в табл. 1.

По данным рентгенофазового анализа пробы хвостов, основные фазы (в порядке убывания): нефелин, микроклин, эгирин, альбит, содалит (рис. 1). В примесных количествах диагностированы лопарит, натролит, эвдиалит, анальцит.

Пробы хвостов обогащения лопаритовых руд подвергались открытому кислотному вскрытию и последующему анализу на содержание микроэлементов методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой на базе ЦКП ИППЭС КНЦ РАН (масс-спектрометр ELAN 9000 DRC-e, Perkin Elmer, США). Результаты анализа приведены в табл. 2.

Моделирование химического выветривания минералов под воздействием атмосферных осадков проводили по ранее описанной методике, исследуя взаимодействие частиц хвостов обогащения лопаритовых руд с дистиллированной водой и слабым раствором серной кислоты [7]. Ввиду длительности природных процессов гипергенных

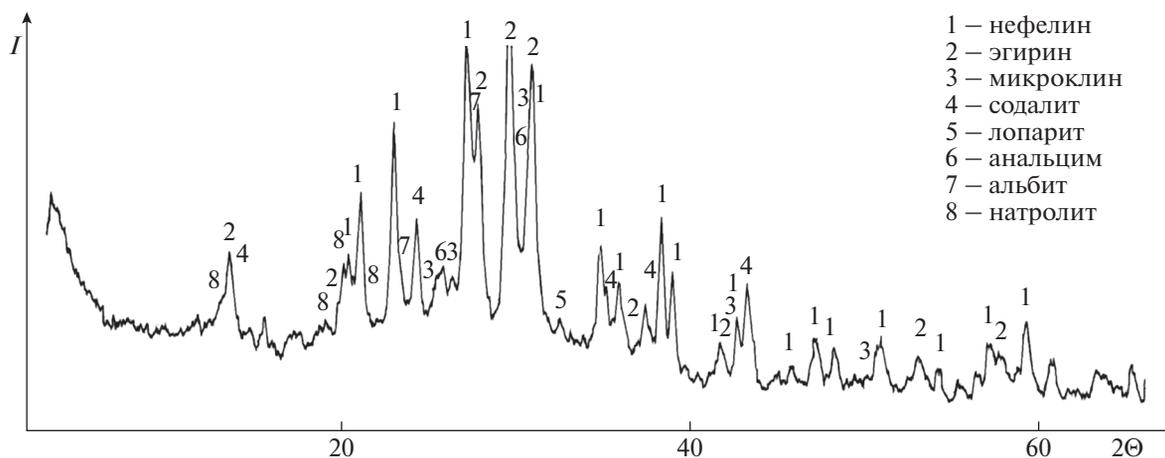


Рис. 1. Рентгенограмма пробы текущих хвостов.

изменений минералов, эксперимент проводили в ускоренном режиме. Пробы хвостов обогащения лопаритовых руд ($m = 70$ г) помещали в термостабируемые ячейки ($t = 50^\circ\text{C}$). Образцы ежедневно увлажняли 0.002 Н раствором серной кислоты в объеме 25 мл/сут в течение 20, 40 и 60 суток. В контрольной серии опытов выщелачивающим агентом выступала дистиллированная вода. По окончании эксперимента высушенные пробы обрабатывали дистиллированной водой в соотношении Т : Ж = 1:10, результирующие растворы фильтровали через мембранный фильтр МФАС ОС-2 (размер пор 0.47 мкм). В фильтратах определяли рН и передавали на количественный химический анализ (ИСП-МС, ионообменная хроматография, прямая потенциометрия, атомно-адсорбционная спектрометрия).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Начальные значения рН и концентраций элементов определяли в растворе, полученном после

обработки хвостов обогащения лопаритовых руд дистиллированной водой, при таком же соотношении Т : Ж и времени обработки ($t = 1$ сут).

Изменение величины водородного показателя растворов после взаимодействия исследуемого материала с водой и разбавленной серной кислотой в зависимости от длительности эксперимента показано на рис. 2. При взаимодействии с водой величина рН незначительно повышается во временном интервале от 20 до 40 сут, а затем возвращается практически к исходному значению. После взаимодействия хвостов с 0.002 Н раствором серной кислоты рН раствора выщелачивания закономерно снижается с увеличением времени опыта. Наибольшее снижение величины водородного показателя происходит в первые двадцать суток.

Представляло интерес проследить гипергенные изменения нефелина и других силикатов, являющихся основными минералами, входящими в состав хвостов обогащения лопаритовых руд. Разрушение силикатной матрицы под действием ди-

Таблица 2. Содержание некоторых элементов в хвостах обогащения лопаритовых руд текущего производства

Элемент	Содержание, мг/кг	Элемент	Содержание, мг/кг	Элемент	Содержание, мг/кг
Ni	7.51	Ce	1031	U	17.4
Cu	6.44	Pr	38.8	Ta	123
Cr	2.30	Nd	121	Nb	1459
Sr	1289	Sm	14.7	W	2.99
Zn	240	Sc	136	Se	0.945
Pb	16.0	Ba	179	As	70.70
Cd	0.175	Sb	0.516	Mn	1580
Co	1.82	Sn	8.28	Al	75800
Li	34.1	V	34.9	Fe	26300
La	202	Th	26.3	Zr	2630

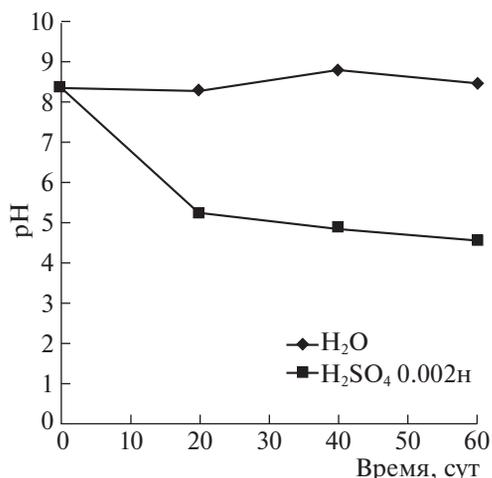


Рис. 2. Изменение величины pH в ходе эксперимента.

стиллированной воды и разбавленной серной кислоты оценивали по результатам анализа фильтратов на содержание калия, натрия, алюминия и кремния (рис. 3).

При проведении опыта с использованием разбавленной серной кислоты растворение минералов и высвобождение этих элементов существенно возрастает. Стоит отметить, что если при взаимодействии с водой в раствор преимущественно переходит кремний (см. рис. 3а), то при увлажнении материала хвостов раствором серной кислоты интенсивнее разрушаются алюмокислородные тетраэдры с образованием $Al_2(SO_4)_3$ (см. рис. 3б).

После взаимодействия хвостов с дистиллированной водой концентрации калия и натрия растут, особенно интенсивно во временном интервале от 40 до 60 сут (см. рис. 3в). Как видно, растворение минералов происходит инконгруэнтно, с преимущественным высвобождением ионов натрия: его концентрация превышает концентрацию калия почти в 20 раз по окончании эксперимента. При взаимодействии хвостов обогащения лопаритовых руд с разбавленной серной кислотой растворение нефелина идет значительно интенсивнее с сохранением неравномерного характера перехода элементов в раствор (см. рис. 3г).

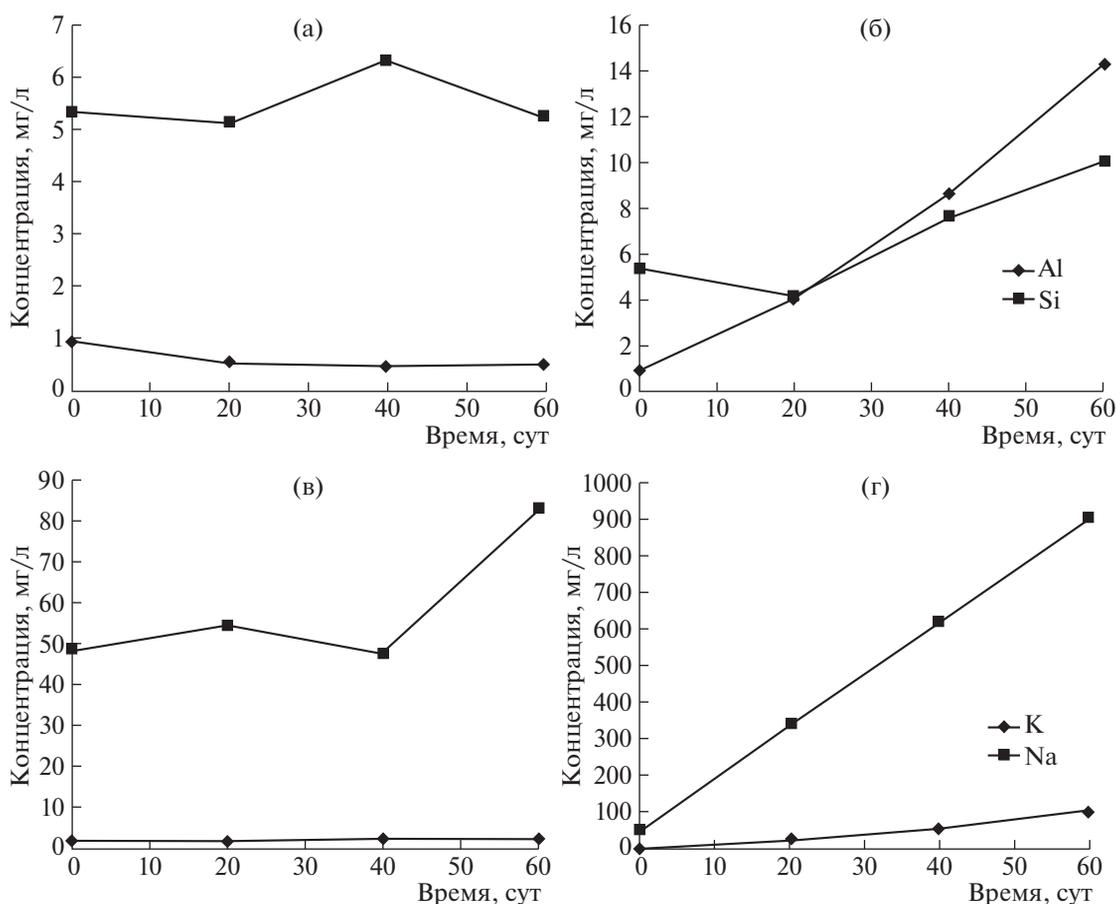


Рис. 3. Концентрации алюминия, кремния, калия и натрия в результирующих растворах при взаимодействии с водой (а, в) и серной кислотой (б, г).

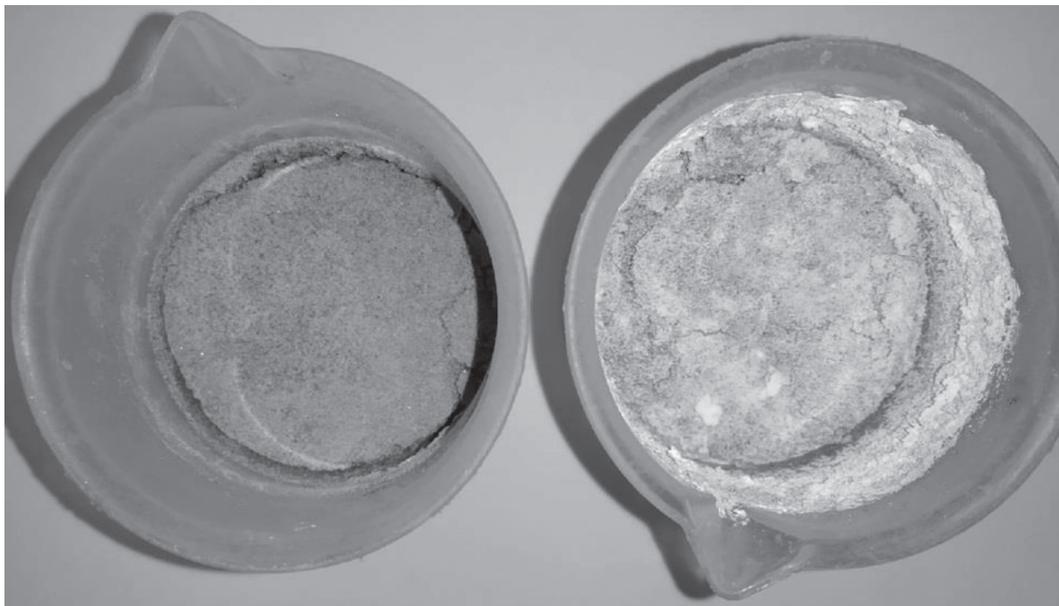
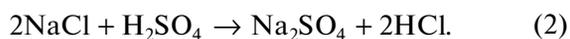
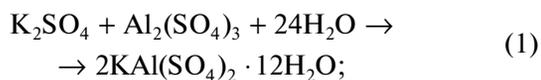


Рис. 4. Внешний вид хвостов обогащения лопаритовых руд по окончании эксперимента. Слева направо: увлажняющий агент – дистиллированная вода, раствор серной кислоты.

На рис. 4 показан внешний вид хвостов по окончании эксперимента (60 сут). Рентгенофазовым анализом установлен состав высолов, образовавшихся на поверхности материала хвостов, – смесь тенардита и 12-водного сульфата алюминия-калия.

Возможные уравнения реакции образования новых диагностированных фаз:



Одна из причин повышенного содержания фтор- и фосфат-ионов в сточных водах предприятия – наличие легкорастворимого фторида натрия (виллиомит) и апатита в составе пород разрабатываемого месторождения [1]. Поэтому также представляло интерес проследить поведение основных анионов, входящих в состав вышеуказанных минералов. На рис. 5 показаны зависимости концентраций фтор- и фосфат-ионов в растворах после взаимодействия хвостов обогащения лопаритовых руд с водой и разбавленной серной кислотой от длительности эксперимента. В фильтрах после взаимодействия хвостов с дистиллированной водой (см. рис. 5а) наблюдается рост концентраций этих анионов в растворе. При этом, уже после первых суток эксперимента отмечено превышение предельно допустимых концентраций для данных анионов в водных объектах рыбохозяйственного значения ($\text{ПДК}_{\text{рхбз}}$) –

0.75 мг/л и 0.05 мгР/л¹ – в 240 и 120 раз для фторидов и фосфатов соответственно.

С увеличением времени взаимодействия материала хвостов с раствором серной кислоты концентрации фторидов и фосфатов снижаются (см. рис. 5б). При увлажнении пробы хвостов слабо концентрированной серной кислотой кальций также активно переходит в растворенную форму и, видимо, образует малорастворимое соединение с ионами фтора². Похожие результаты были получены в экспериментах по водному выщелачиванию хвостов обогащения лопаритовых руд первого поля: при регулировке кислотности раствором серной кислоты со снижением рН подвижность фтор-ионов также снижалась [2].

Изменение концентраций некоторых тяжелых металлов (ТМ), входящих в состав хвостов обогащения лопаритовых руд, в результирующих растворах в зависимости от длительности эксперимента и вида выщелачивающего агента представлено на рис. 6. Как видно, при взаимодействии частиц хвостов с дистиллированной водой уже в

¹ Приказ Минсельхоза России от 13.12.2016 “Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения (с изменениями на 10 марта 2020 года)” от 13 декабря 2016 № 552. URL: <http://docs.cntd.ru/document/420389120>

² РД 52.24.533-2017 “Массовая концентрация фторидов в водах. Методика измерений фотометрическим методом с лантан-ализаринкомплексом в присутствии ацетона” от 08 февраля 2017 № 52.24.533-2017. URL: <http://docs.cntd.ru/document/456052426>

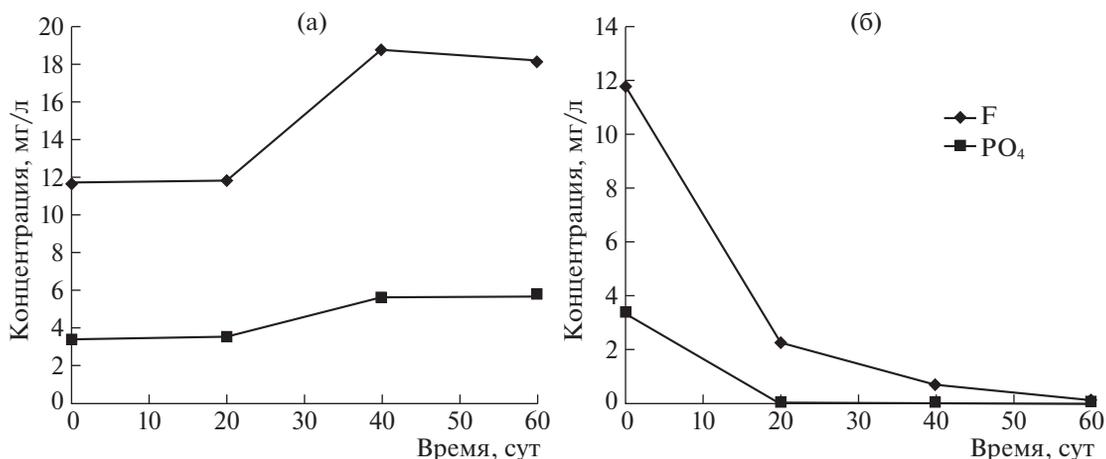


Рис. 5. Концентрации основных анионов в результирующих растворах при взаимодействии с водой (а) и серной кислотой (б).

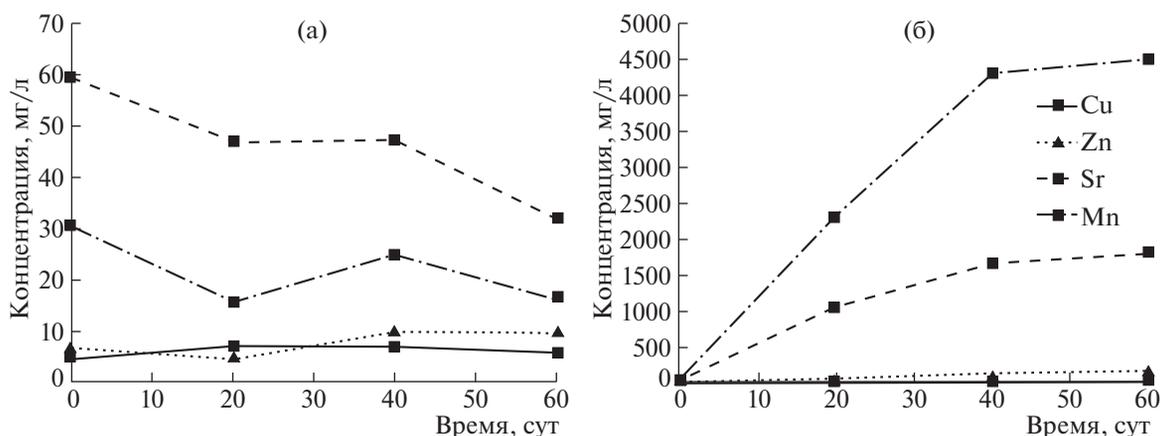


Рис. 6. Концентрации ТМ в результирующих растворах при взаимодействии с водой (а) и серной кислотой (б).

первые сутки наблюдалось превышение ПДК_{рхбз} по меди (1 мкг/л) в 7 раз и незначительное превышение по марганцу (10 мкг/л) (см. рис. 6а). В течение эксперимента концентрация никеля и стронция практически не изменялась, цинка – незначительно росла.

При взаимодействии хвостов обогащения лопаритовых руд с раствором серной кислоты переход ТМ в раствор резко возрастает (см. рис. 6б). При этом их концентрации более чем на порядок превышают аналогичные показатели в опыте с дистиллированной водой в первые двадцать суток эксперимента. После 60 сут превышение ПДК_{рхбз} становится гораздо значительнее: трехкратное – по никелю, пятикратное – по меди и стронцию, цинк превышает предельно допустимую концентрацию в 17 раз, марганец – в 448 раз.

Изменение концентраций редкоземельных элементов (РЗЭ), входящих в состав хвостов обогащения лопаритовых руд, в растворах выщела-

чивания после взаимодействия хвостов с водой и разбавленной серной кислотой в зависимости от длительности эксперимента представлено на рис. 7. Отметим, что ПДК_{рхбз}, а также предельно, и ориентировочно допустимые концентрации РЗЭ в почвах не установлены.

Попадая в почву, РЗЭ из-за различной стабильности связи с гуминовыми веществами, могут как адсорбироваться, так и десорбироваться под влиянием растворенного органического вещества [19, 27]. В целом поведение РЗЭ в почвах схоже с поведением ТМ, однако их фитотоксичность еще недостаточно изучена [25, 26]. Известно, что концентрации РЗЭ легкой группы в корнях сосудистых растений обычно выше, чем в остальных органах растения, в том числе и в побегах [20, 22–24, 26]. Тем не менее, их накопление в листьях и стеблях как основных органах фотосинтеза может приводить к негативным последствиям для развития растений [26].

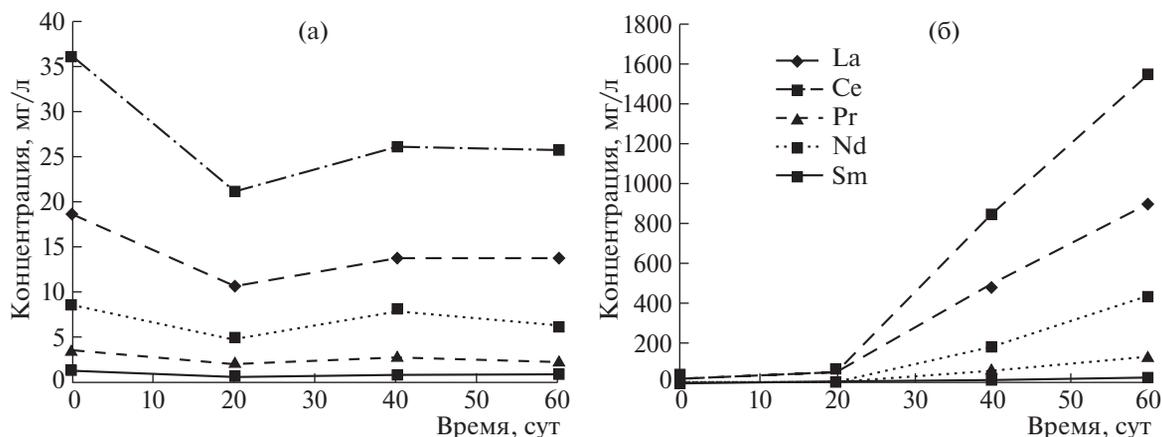


Рис. 7. Концентрации РЗЭ в результирующих растворах при взаимодействии с водой (а) и серной кислотой (б).

Как видно, переход РЗЭ в раствор интенсифицируется при смене выщелачивающего агента с дистиллированной воды на раствор серной кислоты (см. рис. 7б). В частности, концентрация лантана и церия в результирующих растворах по окончании эксперимента превышает аналогичные показатели в контроле (увлажнение дистиллированной водой) в 45 и 60 раз соответственно.

Таким образом, взаимодействие хвостов обогащения лопаритовых руд со слабым раствором серной кислоты приводит к интенсификации перехода металлов, в частности ТМ и РЗЭ, в растворимую, а значит наиболее биодоступную форму.

ВЫВОДЫ

В лабораторных условиях проведено исследование мобилизации экологически опасных элементов из хвостов обогащения лопаритовых руд текущего производства под действием атмосферных осадков.

Результаты анализа фильтратов показали многократное увеличение скорости химического выветривания в условиях, моделирующих воздействие кислотных дождей. Интенсивность разрушения силикатной матрицы основных минералов хвостов обогащения и перехода экологически опасных элементов в растворимые формы в слабокислой среде резко возрастает.

Концентрации ТМ в результирующих растворах через 60 сут эксперимента при увлажнении материала хвостов разбавленным раствором серной кислоты многократно превысили предельно допустимые для водных объектов рыбохозяйственного значения. В частности, ПДК_{рбхз} превышены по никелю – в 3 раза, по меди и стронцию – в 5 раз, по цинку – в 17 раз, по марганцу – в 448 раз.

Отмечен интенсивный переход в раствор РЗЭ легкой группы. В частности, концентрация лан-

тана и церия в результирующих растворах по окончании эксперимента превышает аналогичные показатели в контроле (увлажнение дистиллированной водой) в 45 и 60 раз соответственно. В целом, поведение РЗЭ при выщелачивании схоже с поведением ТМ. Однако в отличие от ТМ, фитотоксичность РЗЭ еще недостаточно изучена.

Возможность и интенсивность выпадения кислотных дождей необходимо учитывать при геоэкологической оценке риска негативного влияния хвостов обогащения лопаритовых руд на окружающую среду.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность А.В. Тимохину и А.А. Горячеву за отбор проб хвостов текущего производства, коллективу аналитиков Центра коллективного пользования ИППЭС КНЦ РАН.

Работа выполнена в рамках темы НИР 0226-2019-0011, и частично поддержана из средств гранта РФФИ №19-05-50065 Микромир.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горячев А.А., Красавцева Е.А., Лашук В.В., Икконен П.В., Смирнов А.А., Максимова В.В., Макаров Д.В. Оценка экологической опасности и возможности переработки хвостов обогащения лопаритовых руд // Экология и промышленность России. 2020. Т. 24. № 12. С. 46–51.
2. Горячев А.А., Лашук В.В., Красавцева Е.А., Алфертьев Н.Л., Макаров Д.В. Геоэкологическая оценка современного состояния разновозрастных хвостохранилищ рудника Карнасурт // Тр. Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2020. № 17. С. 128–132.
3. Доклад о состоянии и об охране окружающей среды Мурманской области в 2018 г. [Электронный ресурс] / Министерство природных ресурсов и

- экологии Мурманской области, 2019.
<https://gov-murman.ru/region/environmentstate/>
4. Кислотные выпадения. Долговременные тенденции / Под ред. Ф. Я. Ровинского. Л.: Гидрометеопиздат, 1990. 440 с.
 5. *Крючков В.В., Макарова Т.Д.* Аэротехногенное воздействие на экосистемы Кольского Севера. Апатиты: Изд. Кольского научного центра АН СССР, 1989. 96 с.
 6. *Луговская А.С., Нестеров Д.П., Васильева Т.Н., Макаров Д.В., Макаров В.Н.* Минералообразование при взаимодействии горнопромышленных отходов с кислотными дождями и кислыми поровыми растворами // *Минералогия техногенеза*. 2003. Т. 4. С. 85–98.
 7. *Максимова В.В., Красавцева Е.А., Макаров Д.В., Маслобоев В.А.* Моделирование химического выветривания хвостов обогащения апатитонепелиновых руд под действием атмосферных осадков // *Минералогия техногенеза*. 2013. № 14. С. 203–209.
 8. *Маркович Т.И.* Особенности гипергенного преобразования минералов в сульфидных отвалах // *Минералогия техногенеза*. 2011. Т. 2. С. 62–76.
 9. *Маслобоев В.А., Селезнев С.Г., Макаров Д.В., Светлов А.В.* Оценка экологической опасности хранения отходов добычи и переработки медно-никелевых руд // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2014. № 3. С. 138–153.
 10. *Месяц С.П., Остапенко С.П.* Методический подход к оценке интенсивности химического выветривания минерального сырья техногенных месторождений // *Вестник Мурманского государственного технического университета*. 2013. Т. 16. № 3. С. 566–572.
 11. *Раткин Н.Е., Шаблова А.В.* Количественная оценка аэротехногенного загрязнения территории Мурманской области (часть 1) // *Теоретическая и прикладная экология*. 2008. № 1. С. 38–44.
 12. *Раткин Н.Е., Шаблова А.В.* Количественная оценка аэротехногенного загрязнения территории Мурманской области (часть 2) // *Теоретическая и прикладная экология*. 2008. № 3. С. 27–34.
 13. *Савенко А.В., Савенко В.С.* Влияние природных органических кислот на мобилизацию макро- и микроэлементов из горных пород // *Доклады Академии наук*. 2019. Т. 485. № 3. С. 351–355.
 14. *Савенко А.В., Савенко В.С.* Кислотная мобилизация алюминия из минералов и горных пород // *Вестник Московского университета. Серия 4: Геология*. 2018. № 5. С. 79–83.
 15. *Савенко А.В., Савенко В.С., Дубинин А.В.* Мобилизация макро- и микроэлементов из горных пород при их взаимодействии с водой // *Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами. Матер. III Всерос. научн. конф. с международным участием. Улан-Удэ: Бурятский научный центр Сибирского отделения РАН*, 2018. С. 165–169.
 16. *Смоляков Б.С., Павлюк Л.А., Немировский А.М.* Кислотность и ионный состав атмосферных осадков и аэрозолей в Новосибирской области // *Оптика атмосферы и океана*. 1996. Т. 9. № 6. С. 773–779.
 17. *Соколова Т.А.* Минералогия и микроморфология почв процессы разрушения кварца, аморфных минералов кремнезема и полевых шпатов в модельных опытах и в почвах: возможные механизмы, скорость, диагностика (анализ литературы) // *Почвоведение*. 2013. № 1. С. 98–112.
 18. *Чантурия В.А., Макаров В.Н., Макаров Д.В.* Изменение нерудных минералов горнопромышленных отходов в процессе хранения под воздействием минеральных кислот // *Инженерная экология*. 2000. № 1. С. 31–40.
 19. *Beckwith R., Butler J.* Aspect of the chemistry of soil organic matter. Soils, an Australian viewpoint. Melbourne: CSIRO; London: Acad. press, 1983. 928 p.
 20. *Carpenter D., Boutin C., Allison J.E., Parsons J.L., Ellis D.M.* Uptake and Effects of Six Rare Earth Elements (REEs) on Selected Native and Crop Species Growing in Contaminated Soils // *PLoS one*. 2015. № 10 (6): e0129936.
 21. *Dehaye J., Badillo M., Zikovsky L.* A laboratory study of the effects of acid rain on industrial waste and its impact on the physicochemical properties of groundwater // *Radioanal. Nucl. Chem*. 1988. V. 127. № 3. P. 209–217.
 22. *Grosjean N., Le Jean M., Berthelot C. et al.* Accumulation and fractionation of rare earth elements are conserved traits in the *Phytolacca* genus // *Sci Rep*. 2019. № 9. 18458.
 23. *Mikołajczak P., Borowiak K., Niedzielski P.* Phytoextraction of rare earth elements in herbaceous plant species growing close to roads // *Environmental Science and Pollution Research*. 2017. № 24 (16). P. 14091–14103.
 24. *Nazreen M., Amalina A., Omar M.* Bioaccumulation of Rare Earth Element by Water Lettuce (*Pistia stratiotes*) // *Oriental Journal of Chemistry*. 2017. № 33. P. 1097–1102.
 25. *Ramos S., Dinali G., Oliveira C., Martins G., et al.* Rare Earth Elements in the Soil Environment // *Current Pollution Reports*. 2016. № 2 (1). P. 28–50.
 26. *Thomas P., Carpenter D., Boutin C., Allison J.* Rare earth elements (REEs): Effects on germination and growth of selected crop and native plant species // *Chemosphere*. 2013. № 96. P. 57–66.
 27. *Wang X., Dong W., Dai X., Wang A., Du J., Tao Z.* Sorption and desorption of Eu and Yb on alumina: mechanisms and effect of fulvic acid // *Appl. Radiat. Isot.* 2000. № 52. P. 165–73.
[https://doi.org/10.1016/s0969-8043\(99](https://doi.org/10.1016/s0969-8043(99)

MOBILIZATION OF ENVIRONMENTALLY HAZARDOUS ELEMENTS FROM DRESSING TAILINGS OF LOPARITE ORES UPON ATMOSPHERIC PRECIPITATION

E. A. Krasavtseva^{a,b,#}, D. V. Makarov^{b,##}, E. A. Selivanova^{c,###}, V. V. Maksimova^{a,b,####},
and A. V. Svetlov^{b,#####}

^a Laboratory of Nature-Inspired Technologies and Environmental Safety of the Arctic,
Federal Research Centre "Kola Science Centre RAS",
ul. Fersmana, 14, Apatity, 184209, Russia

^b Institute of North Industrial Ecology Problems, Federal Research Centre "Kola Science Centre RAS",
ul. Fersmana, 14a, Apatity, 184209, Russia

^c Geological Institute, Federal Research Centre "Kola Science Centre RAS",
ul. Fersmana, 14, Apatity, 184209, Russia

[#]E-mail: e.krasavtseva@ksc.ru

^{##}E-mail: makarov@inep.ksc.ru

^{###}E-mail: selivanova@geoksc.apatity.ru

^{####}E-mail: v.maksimova@ksc.ru

^{#####}E-mail: a.svetlov@ksc.ru

Mobilization of environmentally hazardous elements in dressing tailings of loparite ores under the influence of atmospheric precipitation was studied in laboratory. The dressing tailings of current ore production were the object of study. A lot of mining enterprises polluting the air, water and soil are concentrated in the Murmansk region. Sulfur dioxide is one of the priority air pollutants. To simulate the chemical weathering of dressing tailings, a 0.002 N sulfuric acid solution was used as an acid rain and distilled water, as a control. The experiments were carried out under static conditions in wetting-drying mode by placing the test tailing material in thermostate cells at a temperature of 50°C and daily moistening the samples with 25 ml of the above-mentioned solutions for 20, 40 and 60 days. In the end of experiments, the samples were washed with distilled water (S: L ratio = 1:10), filtered, and analyzed. The filtrate analysis showed a manifold increase in the rate of chemical weathering of minerals in the loparite ore dressing tailings under the conditions simulating the acid-rain effect. Silicate matrix destruction of the main tailing minerals and transition of environmentally hazardous elements into soluble forms intensifies abruptly in weakly acidic environment. The concentration of nonferrous metals in the resulting solutions after the 60-day-long experiments exceeded several times the maximum permissible concentration for water bodies of fishery value. The tailing material was moistened with a dilute sulfuric acid solution. An intense transition of rare-earth elements (REE) of the light group (La–Sm) into the solution was noted. In particular, the concentrations of lanthanum and cerium in the resulting solutions at the end of the experiments exceed the corresponding values in the control groups (treated with distilled water) by 45 and 60 times, respectively. However, unlike non-ferrous metals, the phytotoxicity of REEs has not been sufficiently studied yet. The probability and intensity of acid rains should be taken into account upon the hazard assessment of loparite ore dressing tailings for the environment.

Keywords: dressing tailings, migration, environmental hazard, non-ferrous metals, rare earth elements

REFERENCES

- Goryachev, A.A., Krasavtseva, E.A., Lashchuk, V.V., Ikkonen, P.V., Smirnov, A.A., Maksimova, V.V., Makarov, D.V. *Otsenka ekologicheskoi opasnosti i vozmozhnosti pererabotki khvostov obogashcheniya loparitovykh rud* [Assessment of the environmental hazard and the possibility of processing loparite tailings ores]. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*, 2020. V. 24. № 12. P. 46–51. (in Russian)
- Goryachev, A.A., Lashchuk, V.V., Krasavtseva, E.A., Alfert'ev, N.L., Makarov, D.V. *Geoekologicheskaya otsenka sovremennogo sostoyaniya raznovozrastnykh khvostokhranilishch rudnika Karnasurt* [Geoecological assessment of the current state of tailing dumps of different age at the Karnasurt mine]. *Trudy Fersmanovskoi nauchnoi sessii GI KNC RAN* [Proc. of the Fersman scientific session of the State Institute of the KSC RAS], 2020. № 17. P. 128–132. (in Russian)
- Doklad o sostoyanii i ob okhrane okruzhayushchei sredy Murmanskoi oblasti v 2018 g.* [Report on the state and conservation of the environment in the Murmansk region in 2018]. Ministry of natural resources and ecology of the Murmansk region, 2019. Available at: <https://gov-murman.ru/region/environmentstate/> (accessed 15.01.2021)
- Kislotnye vypadeniya. Dolgovremennye tendentsii* [Acid fall-out. Long-term tendencies]. F. Ya. Rovinsky, Ed., Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1990, 440 p. (in Russian)
- Kryuchkov, V.V., Makarova, T.D. *Aerotekhnogennoe vozdeistvie na ekosistemy Kol'skogo Severa* [Aerotechnogenic impact on ecosystems of the Kola North]. Apatity, Kola Scientific Center of the USSR Academy of Sciences, 1989, 96 p. (in Russian)
- Lugovskaya, A.S., Nesterov, D.P., Vasil'eva, T.N., Makarov, D.V., Makarov, V.N. *Mineraloobrazovanie pri vzaimodeistvii gornopromyshlennykh otkhodov s kislotnymi dozhdymi i kislymi porovymi rastvorami* [Mineral

- formation during the interaction of mining waste with acid rain and acidic pore solutions]. *Mineralogiya tekhnogeneza*, 2003. V. 4. P. 85–98. (in Russian)
7. Maksimova, V.V., Krasavtseva, E.A., Makarov, D.V., Masloboev, V.A. *Modelirovanie khimicheskogo vyvetrivaniya khvostov obogashcheniya apatito-nefelinovykh rud pod deistviem atmosferykh osadkov* [Modeling of chemical weathering of apatite-nepheline ore dressing tailings under the influence of atmospheric precipitation]. *Mineralogiya tekhnogeneza*, 2013. № 14. P. 203–209. (in Russian)
 8. Markovich, T.I. *Osobennosti gipergennogo preobrazovaniya mineralov v sul'fidnykh otvalakh* [Features of hypergene transformation of minerals in sulfide dumps]. *Mineralogiya tekhnogeneza*, 2011. V. 2. P. 62–76. (in Russian)
 9. Masloboev, V.A., Seleznev, S.G., Makarov, D.V., Svetlov, A.V. *Otsenka ekologicheskoi opasnosti khraneniya otkhodov dobychi i pererabotki medno-nikelevykh rud* [Evaluation of the environmental hazard of storage of wastes from mining and processing of copper-nickel ores]. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*, 2014. № 3. P. 138–153. (in Russian)
 10. Mesyats, S.P., Ostapenko, S.P. *Metodicheskii podkhod k otsenke intensivnosti khimicheskogo vyvetrivaniya mineral'nogo syr'ya tekhnogennykh mestorozhdeniy* [Methodical approach to assessing the intensity of chemical weathering of mineral raw materials from technogenic deposits]. *Vestnik Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2013. V. 16. № 3. P. 566–572. (in Russian)
 11. Ratkin, N.E., Shablova, A.V. *Kolichestvennaya otsenka aerotekhnogennogo zagryazneniya territorii Murmanskoi oblasti (chast' 1)* [Quantitative assessment of airborne industrial pollution of the Murmansk region territory (part 1)]. *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya*, 2008. № 1. P. 38–44. (in Russian)
 12. Ratkin, N.E., Shablova, A.V. *Kolichestvennaya otsenka aerotekhnogennogo zagryazneniya territorii Murmanskoi oblasti (chast' 2)* [Quantitative assessment of airborne industrial pollution of the territory of the Murmansk region territory (part 2)]. *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya*, 2008. № 3. P. 27–34. (in Russian)
 13. Savenko, A.V., Savenko, V.S. *Vliyanie prirodnykh organicheskikh kislot na mobilizatsiyu makro- i mikroelementov iz gornykh porod* [Influence of natural organic acids on the mobilization of macro- and microelements from rocks]. *Doklady Akademii nauk*, 2019. V. 485. № 3. P. 351–355. (in Russian)
 14. Savenko, A.V., Savenko, V.S. *Kislotnaya mobilizatsiya alyuminiya iz mineralov i gornykh porod* [Acid mobilization of aluminum from minerals and rocks]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 4: Geologiya*, 2018. № 5. P. 79–83. (in Russian)
 15. Savenko, A.V., Savenko, V.S., Dubinin, A.V. *Mobilizatsiya makro- i mikroelementov iz gornykh porod pri ikh vzaimodeystvii s vodoi* [Mobilization of macro- and microelements from rocks during their interaction with water]. *Geologicheskaya evolyutsiya vzaimodeystviya vody s gornymi porodami. Materialy tret'ey Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem* [Geological evolution of the interaction of water with rocks. Materials of the third All-Russian scientific conference with international participation]. Ulan-Ude, Buryat Scientific Center, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 2018. P. 165–169. (in Russian)
 16. Smolyakov, B.S., Pavlyuk, L.A., Nemirovskii, A.M. *Kislotnost' i ionnyi sostav atmosferykh osadkov i aerozoley v Novosibirskoi oblasti* [Acidity and ionic composition of atmospheric precipitation and aerosols in the Novosibirsk region]. *Optika atmosfery i okeana*, 1996. V. 9. № 6. P. 773–779. (in Russian)
 17. Sokolova, T.A. *Mineralogiya i mikromorfologiya pochvy; protsessy razrusheniya kvartsa, amorfnnykh mineralov kremnezema i polevykh shpatov v model'nykh opytakh i v pochvakh: vozmozhnye mekhanizmy, skorost', diagnostika (analiz literatury)* [Mineralogy and micromorphology of soils, the processes of destruction of quartz, amorphous minerals of silica and feldspars in model experiments and in soils: possible mechanisms, speed, diagnostics (review of publications)]. *Pochvovedeniye*, 2013. № 1. P. 98–112. (in Russian)
 18. Chanturia, V.A., Makarov, V.N., Makarov, D.V. *Izmeneniye nerudnykh mineralov gornopromyshlennykh otkhodov v protsesse khraneniya pod vozdeistviem mineral'nykh kislot* [Changes in nonmetallic minerals of mining waste during storage under the influence of mineral acids]. *Inzhenernaya ekologiya*, 2000. № 1. P. 31–40. (in Russian)
 19. Beckwith, R., Butler, J. *Aspect of the chemistry of soil organic matter. Soils, an Australian viewpoint*. Melbourne, CSIRO, London, Acad. press, 1983, 928 p. (in Russian)
 20. Carpenter, D., Boutin, C., Allison, J.E., Parsons, J.L., Ellis, D.M. *Uptake and effects of six rare earth elements (REEs) on selected native and crop species growing in contaminated soils*. *PLoS One*, 2015. № 10 (6): e0129936. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0129936>.
 21. Dehaye, J., Badillo, M., Zikovskiy, L. *A laboratory study of the effects of acid rain on industrial waste and its impact on the physicochemical properties of groundwater*. *Radioanal. Nucl. Chem*, 1988. V. 127. № 3. P. 209–217.
 22. Grosjean, N., Le Jean, M., Berthelot, C. et al. *Accumulation and fractionation of rare earth elements are conserved traits in the Phytolacca genus*. *Sci Rep*, 2019. № 9, 18458. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-54238-3>
 23. Mikołajczak, P., Borowiak, K., Niedzielski, P. *Phytoextraction of rare earth elements in herbaceous plant species growing close to roads*. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017. № 24 (16). P. 14091–14103. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-8944-2>.
 24. Nazreen, M., Amalina, A., Omar, M. *Bioaccumulation of rare earth element by water lettuce (Pistia stratiotes)*. *Oriental Journal of Chemistry*, 2017. № 33. P. 1097–1102. <https://doi.org/10.13005/ojc/330305>.
 25. Ramos, S., Dinali, G., Oliveira, C., Martins, G., Moreira, C., Siqueira, J., Guilherme, L. *Rare earth elements in the soil environment*. *Current Pollution Reports*, 2016. № 2 (1). P. 28–50. <https://doi.org/10.1007/s40726-016-0026-4>.
 26. Thomas, P., Carpenter, D., Boutin, C., Allison, J. *Rare earth elements (REEs): Effects on germination and growth of selected crop and native plant species*. *Chemosphere*, 2013. № 96. P. 57–66. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.07.020>.
 27. Wang, X., Dong, W., Dai, X., Wang, A., Du, J., Tao, Z. *Sorption and desorption of Eu and Yb on alumina: mechanisms and effect of fulvic acid*. *Appl. Radiat. Isot.*, 2000. № 52. P. 165–73. [https://doi.org/10.1016/S0969-8043\(99\)00133-5](https://doi.org/10.1016/S0969-8043(99)00133-5)

ЗАГРЯЗНЕНИЕ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

УДК 556.531(571.16)

СОСТАВ РЕЧНЫХ ВОД И ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ МАЛЫХ РЕК В УСЛОВИЯХ АНТРОПОГЕННОЙ НАГРУЗКИ (НА ПРИМЕРЕ р. КИСЛОВКА, г. ТОМСК)

© 2021 г. Е. Ю. Пасечник^{1,*}, О. Г. Савичев^{1,**}, В. А. Домаренко^{1,***}, Н. Г. Наливайко^{1,****},
О. Ю. Гончаров^{2,*****}, Н. А. Бровченко^{1,*****}, О. Н. Владимирова^{1,*****}

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Инженерная школа природных ресурсов, пр. Ленина, 30, Томск, 634050 Россия

² ОАО “Томскводоканал”, ул. Шевченко, 41а, Томск, 634021 Россия

*E-mail: pseyu@yandex.ru

**E-mail: osavichev@mail.ru

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

****E-mail: nng@tpu.ru

*****E-mail: goncharov@vodokanal.tomsk.ru

*****E-mail: beautiful54@mail.ru

*****E-mail: onv-2018@yandex.ru

Поступила в редакцию 01.12.2020 г.

После доработки 11.02.2021 г.

Принята к публикации 21.02.2021 г.

Выполнен комплекс полевых, лабораторных (с использованием методов ICP MS, порошковой рентгеновской дифрактометрии, сканирующей электронной микроскопии и микробиологического анализа) и камеральных работ по изучению распределения вещественного состава донных отложений и вод р. Кисловка у г. Томск (Западная Сибирь, речная система: “Кисловка–Томь–Обь”) в зимнюю межень 2020 г. Установлено, что в речных водах максимумы содержаний соединений N и P приурочены к местам сброса хозяйственно-бытовых стоков, а редкоземельных элементов – к относительно недавно застроенным участкам водосбора, на которых проводилась отсыпка территории привозным грунтом. Влияние выпуска стоков станции обезжелезивания Томского подземного водозабора связано в основном с резким увеличением концентраций Fe и P в донных отложениях и уменьшением разнообразия минерального состава фракции до 1 мм. Оно прослеживается на участке около 1 км ниже выпуска и сильно снижается в пределах 5–6 км ниже по течению.

Ключевые слова: химический, микробиологический и минеральный состав, донные отложения, речные воды, река Кисловка, Томск, Западная Сибирь

DOI: 10.31857/S0869780921030061

ВВЕДЕНИЕ

Малые реки селитебных территорий часто испытывают значительное антропогенное воздействие, в той или иной степени утрачивая черты природных объектов. На региональном уровне это может сказываться на состоянии больших рек и подземных вод, что делает актуальным исследование проблемы эволюции природно-антропогенных водных объектов и условий трансформации их состояния. Указанная проблема была рассмотрена на примере малой р. Кисловка у г. Томск (Российская Федерация, Сибирский федеральный округ, административный центр Томской области) – элемента речной системы “Кисловка–Томь–Обь” (рис. 1).

Река Кисловка образуется при слиянии рек Еловка и Жуковка, протекает по территории Обь-Томского междуречья, в том числе в пределах долины р. Томи, а затем соединяется с ее протокой (поверхностный сток перекрыт после строительства дороги Томск–Юрга с мостовым переходом через р. Томь) и, собственно, превращается в протоку Бурундук с рядом озеровидных расширений (далее используется только термин – р. Кисловка). Длина объекта (от истоков р. Жуковка) – 80 км, площадь водосбора (с учетом условного водосбора в долине р. Томь) – 458 км². В пределах водосбора расположены населенные поселки и микрорайоны Томска и Томского района (п. Кисловка, п. Тимирязево, с. Петрово и ряд других, включая новый микрорайон “Северный Парк” с много-

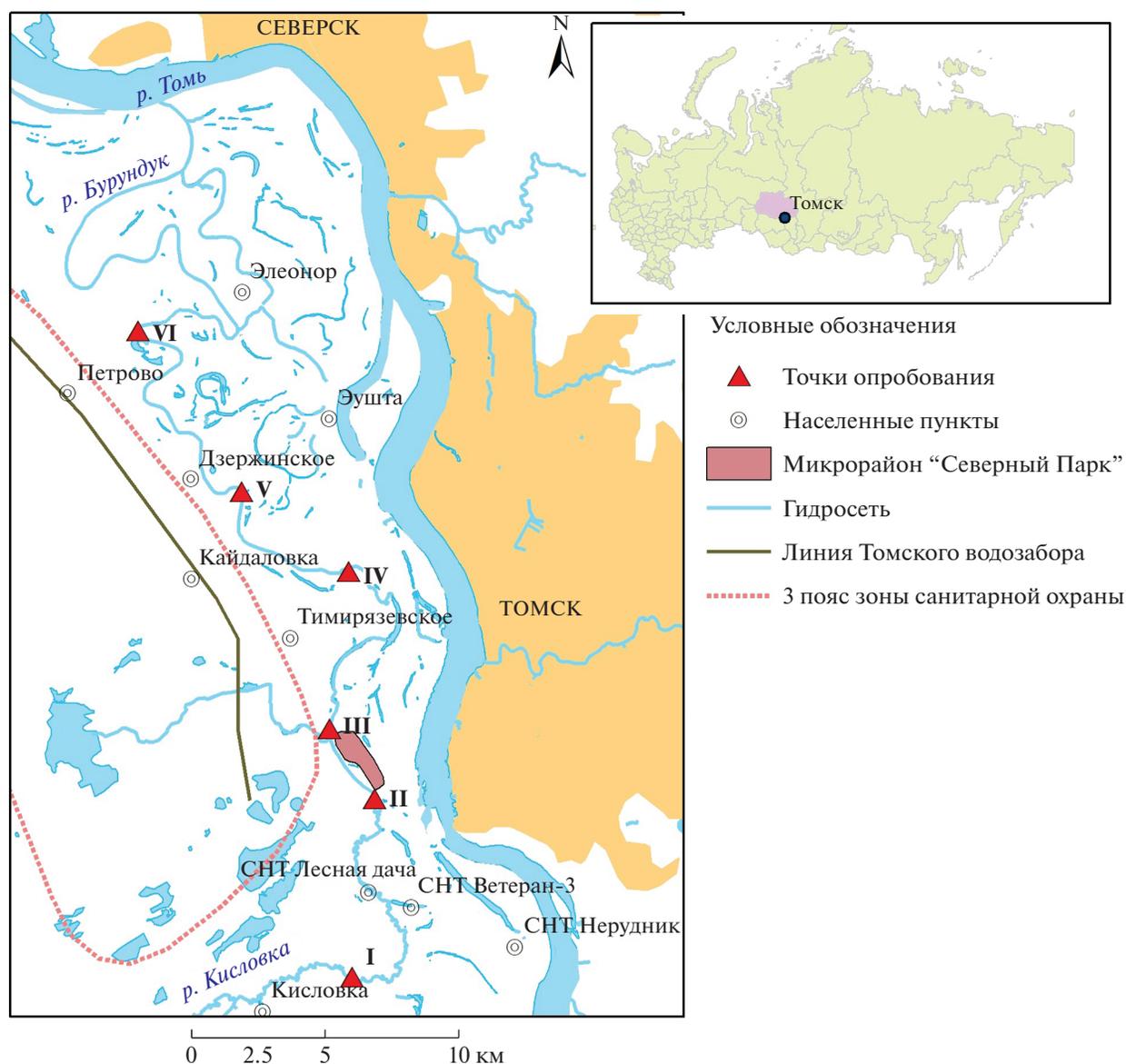


Рис. 1. Схема расположения р. Кисловка и пунктов отбора проб воды и донных отложений в зимнюю межень 2020 г. (характеристика пунктов I–VI приведена в табл. 1).

этажной застройкой) с выпусками в реку очищенных и неочищенных хозяйственно-бытовых стоков. Главная же особенность рассматриваемой территории – наличие одновременно эксплуатационных скважин и выпуска (в р. Кисловка, пункт III) сточных вод станции обезжелезивания Томского подземного водозабора.

Томский подземный водозабор – один из крупнейших подземных водозаборов в Российской Федерации – обеспечивает хозяйственно-питьевое водоснабжение г. Томск – центра Томской области с населением (с учетом пригорода и г. Северск) более 0.5 млн человек. Водозабор функционирует с 1973 г. и эксплуатирует Томское месторождение пресных вод в Обь-Томском меж-

дуречье. Отбор подземных вод проводится из песчано-галечниковых отложений палеогенового возраста с глубин 80–198 м [3, 5, 6].

Подземные воды в исходном состоянии – пресные, гидрокарбонатные кальциевые и кальциево-магниевые, по величине рН – от слабокислых до слабощелочных (табл. 1); их химический состав в целом соответствует нормативам качества питьевых вод, но последние достаточно часто нарушаются по содержанию железа, находящегося в подземных водах (в основном в виде иона Fe^{2+} и его соединений) в количестве до 12 мг/дм³ и более [2, 3, 5, 11–13, 17].

На станции водоподготовки с фактической среднесуточной подачей воды 136 м³/сут (при проектной производительности 205.5 тыс. м³/сут) проводят обезжелезивание подземных вод путем их аэрирования, а затем пропуска самотеком сверху вниз с расчетной скоростью 8–10 м/час через скорые фильтры, загруженные слоем от 1.40 до 1.65 м отсевом дробленых горных пород крупностью 2–5 мм. В результате образуется почти 150 т/год железосодержащего осадка. На протяжении длительного времени промывные воды после фильтров сбрасывались в р. Кисловка.

В настоящее время создана система повторно-го использования промывных вод, которая позволила значительно уменьшить сброс промывных вод и содержащихся в них загрязняющих веществ. Тем не менее, можно предположить, что, по крайней мере, за предыдущий период в русле Кисловки сформировались природно-техногенные отложения с повышенным содержанием железа и ряда других химических элементов, особенно с учетом поступления в реку на участке выше по течению значительного количества хозяйственно-бытовых стоков с разной степенью очистки (от пп. Кисловка, Тимирязево, Дзержинский, садовых обществ, нового микрорайона Томска “Северный Парк”).

Цель исследования – выявление изменений химического и микробиологического состава речных вод, химического, микробиологического и минерального состава донных отложений малой р. Кисловка под влиянием сброса сточных вод станции обезжелезивания Томского подземного водозабора и иных антропогенных факторов.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Для достижения указанной выше цели сотрудниками Томского политехнического университета (ТПУ) выполнен комплекс полевых, лабораторных и камеральных работ. Отбор проб воды и донных отложений р. Кисловка (протоки Бурундук) проведен в зимнюю межень 2020 г., в условиях ледостава, когда создаются наихудшие условия разбавления стоков и самоочищения на фоне сокращения водного стока и содержаний растворенного кислорода. Отбор проб выполнен с помощью ледового бура и пробоборников для воды (из слоя 0.3–0.5 м от поверхности воды в лунке) и донных отложений (верхний слой 0.2 м) с учетом требований [1, 15] в шести пунктах (см. рис. 1), расположенных последовательно от п. Кисловка к устью: I – в 29.8 км от Томи; II, III – выше и ниже нового микрорайона “Северный Парк”, расположенного в пойме Томи; IV – ниже по течению от перехода дороги Томск–Тимирязево, на границе поймы и первой надпойменной террасы Томи; V – в 0.86 км ниже по течению от створа

выпуска стоков станции обезжелезивания Томского подземного водозабора; VI – в 7.5 км от устья (даты отбора проб: I, II, III – 24.01.2020 г.; IV, V, VI – 06.02.2020 г.). Пункты I и II расположены непосредственно на р. Кисловка, прочие пункты – в пределах поймы р. Томь, в русле протоки Бурундук. В пунктах I и V дополнительно отобраны пробы донных отложений послойно через 0.1 м на глубину 0.5 м для изучения вертикального распределения микробиологических показателей.

Пробы воды и донных отложений были помещены в специально подготовленные емкости и доставлены в аккредитованные лаборатории ТПУ и ООО “Химико-аналитический центр “Плазма” (г. Томск). В ТПУ проведено определение физико-химических, гидрохимических и микробиологических показателей (Л.А. Ракул, К.Б. Кривцова, А.С. Погуца, Н.В. Бублий, В.В. Куровская под руководством А.А. Хвасцевской) с использованием следующих методов: рН – потенциометрический; удельная электропроводность (УЭП) – кондуктометрический; CO₂, CO₃²⁻, HCO₃⁻, Cl⁻, Ca²⁺, Mg²⁺, перманганатная окисляемость (ПО) – титриметрический; SO₄²⁻ – турбидиметрический; NH₄⁺, NO₂⁻, NO₃⁻ – фотометрический; Na⁺, K⁺ – ионная хроматография; Fe, Si и ряд микроэлементов – масс-спектрометрический с индуктивно-связанной плазмой (с использованием масс-спектрометра NexION 300D).

Изучение микрофлоры выполнено в ТПУ (Н.Г. Наливайко). Оно включало выявление различных физиологических групп гетеро- и литотрофных микроорганизмов (включая гетеротрофные железобактерии, аммонифицирующие, нитрифицирующие, денитрифицирующие, сульфатвосстанавливающие и тионовые бактерии) в пробах речной воды и водных вытяжках из донных отложений (в пунктах I и V) с использованием классических методик, принятых в микробиологии [14]. Более подробная информация о методике пробоподготовки и методах химического и микробиологического анализа изложена в [8].

Оценка химического состава донных отложений (фракция с диаметром частиц до 1 мм с извлечением кислоторастворимых форм элементов) выполнена в ООО “Химико-аналитический центр “Плазма” также с использованием масс-спектрометрического метода с индуктивно связанной плазмой (МВИ № 001-ХМС-2007; ФР.1.31.2007.04107; Т.А. Филипас, А.Н. Маковенко под руководством Н.В. Федюниной). Определение минерального состава проведено в ТПУ методами порошковой рентгеновской дифрактометрии (дифрактометр D2 Phaser) и сканирующей электронной микроскопии (микроскоп TESCAN VEGA 3 SBU). Методика анализа веще-

Таблица 1. Физико-химические и геохимические показатели состояния р. Кисловка и подземных вод эксплуатируемого горизонта Томского подземного водозабора

Показатель ¹	Пункты наблюдений в зимнюю межень 2020 г. ² (см. рис. 1)						р. Кисловка (участок от п. Кисловка до устья) ³	Подземные воды отложений палеогенового возраста ⁴	ПДК _{хп} ⁵	ПДК _{рх} ⁵
	I	II	III	IV	V	VI				
L_y , км	29.8	23.7	21.8	16.6	13.2	7.5	28.0–0.5	–	–	–
Вода										
Q_a , м ³ /с	0.21	0.31	0.34	0.42	0.47	0.56	–	–	–	–
pH, ед.	7.62	7.53	7.28	7.86	7.66	7.63	7.74	7.30	6.0–9.0	6.5–8.5
ПО, мгО/дм ³	3.2	2.3	2.7	3.5	3.5	3.6	9.60	2.10	5.0	–
мг/дм ³										
CO ₂	3.5	3.5	3.5	6.2	4.4	6.2	–	–	–	–
Σ_{mi}	336.6	342.9	308.2	330.5	361.5	412.2	330.3	457.1	1000	1000
Ca ²⁺	60.0	62.0	55.0	57.3	65.0	73.0	58.5	75.8	–	180
Mg ²⁺	8.2	8.5	8.8	8.5	8.8	11.8	11.5	14.5	50	40
Na ⁺	8.7	9.8	9.7	11.3	12.8	13.0	9.2	15.6	200	120
K ⁺	1.0	1.1	1.6	1.0	1.7	1.6			–	50
HCO ₃ ⁻	254.0	254.0	224.0	244.0	265.0	299.0	237.0	345.0	–	–
Cl ⁻	3.7	4.8	5.5	6.3	6.6	7.5	3.3	6.2	350	300
SO ₄ ²⁻	1.0	2.7	3.6	2.1	1.6	6.3	10.9	–	500	100
NO ₃ ⁻	0.68	0.45	0.32	2.62	1.98	4.5	5.569	0.03	45	40
NO ₂ ⁻	0.066	0.22	0.43	0.01	0.01	0.01	0.081	0.004	3.30	0.08
NH ₄ ⁺	0.91	1.39	2.3	0.085	0.066	0.066	0.808	0.62	1.9	0.5
P	0.018	0.044	0.208	0.079	0.129	0.081	–	–	1.14	0.065
Si	7.52	7.16	6.78	7.74	7.47	9.50	2.67	2.19	10	–
Fe	0.218	0.329	3.530	0.324	0.576	0.687	1.265	4.40	0.3	0.1
мкг/дм ³										
Al	1.29	1.31	7.42	2.44	3.16	2.65	–	–	200	40
Mn	86.3	558.9	106.6	780.7	708.7	854.6	110.90	10.7	100	10
Cu	1.26	1.03	0.59	0.59	1.52	0.93	3.80	1.10	1000	1
Zn	2.27	2.11	2.55	3.16	7.46	3.50	10.60	55.00	1000	10
La	0.0024	0.0075	0.0205	0.0056	0.0082	0.0051	–	–	–	–
Ce	0.0040	0.0106	0.0496	0.0105	0.0112	0.0112	–	–	–	–
Sm	0.0003	0.0038	0.0170	0.0014	0.0012	0.0015	–	–	–	–
Кислотная вытяжка из фракции до 1 мм донных отложений в пределах верхнего слоя 0,2, мг/кг										
P	5068	2678	1822	605	42248	3604	–	–	–	–
Fe	73237	57979	51396	35718	326946	60428	–	–	–	–
La	17.32	20.32	25.97	22.63	4.18	20.60	–	–	–	–
Ce	30.72	41.13	51.68	45.73	8.84	42.49	–	–	–	–
Sm	3.03	3.16	4.85	4.56	1.07	3.17	–	–	–	–

Примечание: 1 – показатель: L_y – расстояние от устья р. Кисловки (протоки Бурундук); Q_a – расчетный среднеголетний расход воды; ПО – перманганатная окисляемость; Σ_{mi} – сумма главных ионов (Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, HCO₃⁻, CO₃²⁻, Cl⁻, SO₄²⁻); 2 – пункты наблюдений в 2020 г.: I – ниже п. Кисловка; II – выше мкр. “Северный Парк”; III – ниже мкр. “Северный Парк”; IV – ниже сброса п. Тимирязево; V – 0.86 км ниже сброса станции водоподготовки; VI – с. Петрово; 3 – среднее арифметическое, полученное по данным [4, 7] и фоновым материалам ТПУ, количество проб от 15 до 48; 4 – среднее арифметическое по данным [2], количество проб 72; 5 – предельно допустимая концентрация в водах назначения: ПДК_{хп} – хозяйственно-питьевого; ПДК_{рх} – рыбохозяйственного; ПДК для фосфора приведены пересчетом на фосфор, причем в случае рек – для эвтрофных объектов.

ственного состава донных отложений более подробно приведена в [9, 10].

Следует отметить, что визуально заметный подпор от Томи в период половодья ежегодно наблюдается в створе пункта VI. В прочих пунктах подпор возможен, но выражен не так сильно вследствие снеготаяния непосредственно на пойме, локального подпора от мостовых переходов и достаточно сложного перераспределения водных масс при затоплении поймы [4, 7].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Воды р. Кисловка в среднем за период наблюдений с 1995 г. до 2002 г. оцениваются как пресные (по сумме Σ_{mi} главных ионов HCO_3^- , CO_3^{2-} , SO_4^{2-} , Cl^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+), гидрокарбонатные (в среднем 45%-экв. от Σ_{mi} , NO_3^- , NO_2^- , NH_4^+) кальциевые (34%-экв.), по величине pH – нейтральные и слабощелочные; воды эксплуатируемого (основного) палеогенового водоносного комплекса (за период до 2003 г.) – также пресные, гидрокарбонатные (66%-экв.) кальциевые (44%-экв.), по pH – обычно нейтральные (см. табл. 1). Особенностью суммарного содержания растворенных солей в р. Кисловка является достаточно слабая изменчивость величины Σ_{mi} ; коэффициент вариации составляет $Cv = \sigma/A = 0.24$, где σ и A – среднее квадратическое и среднее арифметическое значения.

Непосредственно в период наблюдений в зимнюю межень 2020 г. показатели химического состава речных вод были сопоставимы со средними значениями. При анализе изменений гидрохимических показателей по длине изученного участка р. Кисловка отмечено уменьшение суммы главных ионов Σ_{mi} , концентраций Ca^{2+} и HCO_3^- в пункте III, расположенном ниже по течению от нового микрорайона “Северный Парк”, и последующее увеличение к устью. В пункте III также зафиксированы максимальные концентрации в речной воде NO_2^- , NH_4^+ , P, Fe, V, Ge, As, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Ho, Er, Yb. Максимумы содержаний многих элементов и соединений (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , F^- , Si, Sc, Cr, Mn, Co, Ga, Sr, Zr, Nb, Mo, Rh, Pd, Sb, I, Cs, Ba, Gd, Tb, Dy) отмечены в пункте VI, который расположен на минимальном расстоянии от устья в зоне часто наблюдаемого подпора от р. Томь (см. табл. 1).

Уменьшение значений Σ_{mi} и максимальные концентрации многих микроэлементов в пункте III, вероятно, объясняются поступлением поверхностного и грунтового стока с территории микрорайона “Северный Парк”, часть которого размещена на насыпном грунте. Из-за теплопотерь жи-

лых зданий в период наблюдений происходило таяние снежного покрова и, соответственно, поступление в русло р. Кисловка ультрапресных слабокислых талых вод, вступающих во взаимодействие с насыпными грунтами с повышенным содержанием ряда химических элементов.

Последующее же последовательное возрастание суммы главных ионов Σ_{mi} от пункта IV к устью может быть связано, скорее всего, с увеличением по мере приближения к р. Томь притока более минерализованных подземных вод. Влияние подпора от Томи (с поступлением в русло р. Кисловка вод с минерализацией более 300–350 мг/дм³) в зимнюю межень маловероятно, особенно с учетом того, что минерализация вод р. Томь у г. Томск в этот период составляет в среднем 262–334 мг/дм³ [4, 7]. При этом воздействие собственно выпуска сточных вод станции обезжелезивания Томского подземного водозабора на минерализацию и химический состав вод р. Кисловка ограничено в основном некоторым повышением в пункте V (в 0.86 км ниже выпуска) концентраций K⁺, Be, B, Ni, Cu, Zn, In, Sn, Ir, Tl, La, Tm. Но уже в 5.7 км ниже по течению (пункт VI) уровень содержания перечисленных элементов заметно снижается (см. табл. 1).

Более яркое, по сравнению с речными водами, влияние выпуска стоков станции обезжелезивания установлено для донных отложений. В частности, отмечено резкое увеличение концентраций P (42.238 г/кг) и Fe (326.946 г/кг) в пункте V. Там же обнаружены и аномальные отклонения в минеральном составе фракции до 1 мм, представленном в основном двумя минералами – кварцем (20.4%) и вивианитом (79.6%; табл. 2). В остальных пунктах (I, II, III, IV, VI) в зимнюю межень 2020 г. концентрации P были в диапазоне 0.605–5.068 г/кг, Fe – от 35.718 до 73.237 г/кг, а в минеральном составе преобладали кварц (44.9–57.9%), плагиоклазы (альбит – 12.3–31.1%), калиевые полевые шпаты (микроклин – 5.5–27.5%) при значительном содержании амфиболов (до 9.9%), хлоритов (клинохлор – 4.4–5.9%), гидрослюд (до 3.9%). Также были отмечены барит, гетит, пирит, фосфаты редкоземельных элементов и ряд других минералов (рис. 2).

Таким образом, на участке со специфической мононагрузкой (в районе пункта V) в химическом составе донных отложений резко возрастают концентрации основного загрязняющего вещества (Fe) на фоне резкого снижения минерального разнообразия. Близкий по смыслу вывод был сделан при изучении Обского болота (в левобережной части р. Обь в 35–45 км на запад от рассматриваемой территории, см. рис. 1), где на загрязненном участке отмечен более высокий уровень содержания многих химических элементов в болотных водах, а на фоновом – большее разнооб-

Таблица 2. Минеральный состав донных отложений р. Кисловка в зимнюю межень 2020 г. (результаты рентгенофазового анализа фракции до 1 мм), %

Показатель	Пункты наблюдений (см. рис. 1)					
	I	II	III	IV	V	VI
Кварц	53.6	57.9	44.9	47.5	20.4	47.3
Альбит	27.1	17.7	28.4	12.3	—	31.1
Микроклин	11.7	5.5	8.9	27.5	—	7.1
Актинолит	—	—	—	—	—	6.1
Тремолит	—	3.4	—	—	—	—
Паргазит	—	—	9.9	3.3	—	—
Клинохлор	5.0	5.3	5.4	5.9	—	4.4
Иллит	2.6	2.4	2.6	3.1	—	3.9
Вермикулит	—	—	—	0.3	—	—
Вивианит	—	5.9	—	—	79.6	—
Гетит	—	1.7	—	—	—	—

разие минерального состава включений в торф [16]. С учетом этого можно предположить, что, по крайней мере, для исследуемого региона длительный сброс сточных вод может приводить к формированию противоположных тенденций изменения химического и минерального состава донных отложений рек и торфов.

В микробиологическом составе речных вод отмечены различные физиологические группы микроорганизмов (табл. 3). Наиболее высокие концентрации тионовых и аммонифицирующих бактерий на участке от п. Кисловка до п. Тимирязево, а нитрифицирующих, денитрифицирующих и сульфатвосстанавливающих бактерий — на участке от п. Тимирязево до устья. При этом повышенные содержания тионовых и аммонифицирующих бактерий наблюдаются там же, где наиболее высокие концентрации ионов NH_4^+ и NO_2^- , источником которых с большой вероятностью являются

хозяйственно-бытовые стоки. Воздействием этого же фактора объясняется преобладание в пунктах II и III сапрофитов по сравнению с олиготрофами и высокое содержание аллохтонных мезофильных сапрофитов (в незагрязненных водах их содержание обычно не превышает 50 мл/кл).

Явно выраженное влияние сброса промывных вод станции обезжелезивания ОАО “Томскводоканал” на микробиологический состав речных вод на момент проведения исследования не отмечено. Однако в пробах донных отложений в пункте V, по сравнению с пунктом I, выявлено заметное увеличение содержаний гетеротрофных бактерий, окисляющих восстановленные формы железа (далее — Fe-окисляющие), денитрифицирующих и сульфатвосстанавливающих бактерий, особенно в верхнем слое 0.0–0.4 м (за исключением сульфатвосстанавливающих бактерий с максимумом в слое 0.5–0.6 м) (табл. 4).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ полученной информации показал, что в речных водах максимумы содержаний соединений азота и фосфора приурочены к местам сброса хозяйственно-бытовых стоков, а наиболее высокие концентрации редкоземельных элементов — к относительно недавно застроенным участкам водосбора р. Кисловка, на которых проводилась отсыпка привозным грунтом.

Воздействие на химический состав речных вод многолетнего сброса стоков, образующихся при обезжелезивании пресных подземных вод питьевого назначения, прослеживается относительно слабо и заключается в некотором увеличении концентраций K^+ , Be, B, Ni, Cu, Zn, In, Sn, Ir, Tl, La, Tm на участке около 1 км ниже по течению от выпуска стоков.

Более заметно влияние сброса стоков станции обезжелезивания Томского подземного водозабора на химический и минеральный состав дон-

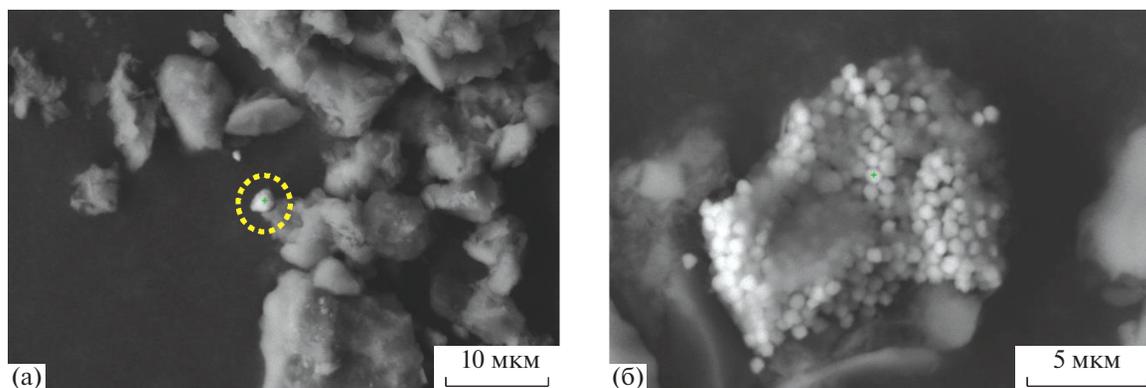


Рис. 2. Результаты электронной микроскопии, пункт III, фракция до 1 мм: а — монацит (частица выделена пунктиром; проба 6s); б — фрамбоидальный пирит (проба 15).

Таблица 3. Микробиологический состав вод р. Кисловка в зимнюю межень 2020 г., кл/мл

Группы бактерий	Пункты наблюдений (см. рис. 1)					
	I	II	III	IV	V	VI
Мезофильные сапрофиты	390	780	390	40	550	7300
Психрофильные сапрофиты	3250	13910	7090	70	1460	170
Олиготрофы:	4600	5260	2620	150	10100	3830
образующие гидроксиды Fe	0	360	180	0	110	160
гетеротрофные Fe-окисляющие	1000	1000	1000	10000	100	100
Аммонифицирующие	100	1000	1000	100	10	10
Нитрифицирующие	1000	1000	100000	10000	100000	100000
Денитрифицирующие	10000	10000	1000	100000	100000	100000
Нефтеокисляющие	370	360	1040	3550	4700	3930
Сульфатвосстанавливающие	10	100	10	10000	1000	100
<i>Thiobacillus thioarvus</i>	100	1000	1000	0	0	0
<i>Thiobacillus novellus</i>	450	4100	910	0	0	0
<i>Thiobacillus intermedius</i>	5200	4500	6250	910	830	1440

Таблица 4. Микробиологический состав донных отложений р. Кисловка, кл/мл

Группы бактерий	Пункт (см. рис. 1) и интервал опробования (м)										
	I					V					
	0.0–0.1	0.1–0.2	0.2–0.3	0.3–0.4	0.4–0.5	0.0–0.1	0.1–0.2	0.2–0.3	0.3–0.4	0.4–0.5	0.5–0.6
Мезофильные сапрофиты	>10 ⁶	0	930	20	60	19370	5710	540300	1620	1400	480
Психрофильные сапрофиты	1100	1300	5600	1450	6500	7020	8400	7750	190	11650	6600
Олиготрофы	530	4230	3110	3000	760	1500	310	14700	1000	5000	1230
образующие гидроокислы Fe	30	40	380	20	780	110	80	20	40	70	190
гетеротрофные Fe-окисляющие	10	100	10000	10	1000	10000	10000	1000	1000	100	100
Аммонифицирующие	10	100	1000	10	10	10000	1000	10	1000	10000	10000
Нитрифицирующие	1000	1000	1000	100	10000	10000	10	1000	10000	1000	1000
Денитрифицирующие	10	1000	10	10	10	1000	10	1000	1000	1000	10000
Нефтеокисляющие	1700	0	2810	2360	12760	230	670	2610	480	5320	8610
Сульфатвосстанавливающие	10	10	100	100	100	1	1000	1000	1000	1000	10000
<i>Thiobacillus thioarvus</i>	1000	10000	1000	10000	10000	10000	0	0	100	0	1000
<i>Thiobacillus novellus</i>	40	170	970	740	50000	60	0	0	220	1810	280
<i>Thiobacillus intermedius</i>	70	490	480	540	19600	360	890	370	780	570	3240

ных отложений. Оно проявляется в резком увеличении во фракции менее 1 мм концентраций Fe и P (в кислотных вытяжках) и снижении разнообразия минеральных форм за счет образования вианита. Ниже по течению это влияние уменьшается, и в 6.56 км от выпуска практически не прослеживается.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 18-55-80015.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- ГОСТ Р 56060-2014. Производственный экологический мониторинг. Мониторинг состояния и загрязнения окружающей среды на территориях объектов размещения отходов. М.: Стандартинформ, 2015. 5 с.
- Колоколова О.В. Геохимия подземных вод района Томского водозабора: автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Томск: Томский политехн. ун-т, 2003. 21 с.

3. Лисецкий В.Н., Брюханцев В.Н., Андрейченко А.А. Улавливание и утилизация осадков водоподготовки на водозаборах г. Томска. Томск: Изд-во НТЛ, 2003. 164 с.
4. Льготин В.А., Савичев О.Г., Нигороженко В.Я. Состояние поверхностных водных объектов, водохозяйственных систем и сооружений на территории Томской области в 2000-2005 гг. Томск: ОАО "Томскгеомониторинг", "АГРАФ-ПРЕСС", 2006. 88 с.
5. Попов В.К., Пасечник Е.Ю., Проценко П.И., Гончаров О.Ю. Редкоземельные элементы в подземных водах Томского водозабора // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2018. Т. 329. № 6. С. 97–105.
6. Рогов Г.М., Попов В.К., Осипова Е.Ю. Проблемы использования природных вод бассейна реки Томи для хозяйственно-питьевого водоснабжения. Томск: Изд-во Томск. гос. архит.-строит. ун-та, 2003. 218 с.
7. Савичев О.Г. Водные ресурсы Томской области. Томск: Изд-во Томск. политехн. ун-та, 2010. 248 с.
8. Савичев О.Г., Наливайко Н.Г., Рудмин М.А., Мазуров А.К. Микробиологические условия распределения химических элементов по глубине торфяной залежи в экосистемах восточной части Васюганского болота (Западная Сибирь) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2019. Т. 330. № 9. С. 184–194. <https://doi.org/10.18799/24131830/2019/9/2272>
9. Савичев О.Г., Домаренко В.А., Перегудина Е.В., Лепкурова О.Е. Трансформация минерального состава донных отложений от истоков к устьям рек // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2018. Т. 329. № 7. С. 43–56.
10. Соктоев Б.Р., Рихванов Л.П., Барановская Н.В., Замана Л.В., и др. Минералого-геохимические особенности источника Ямкун (Забайкальский Край) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2019. Т. 330. № 7. С. 140–154. <https://doi.org/10.18799/24131830/2019/7/2191>
11. Состояние геологической среды (недр) территории Томской области в 2014 г. Вып. 20. АО "Томскгеомониторинг". Томск: ООО "Д-принт", 2015. 84 с.
12. Состояние геологической среды (недр) территории Томской области в 2015 г. Вып. 21. АО "Томскгеомониторинг". Томск: ООО "Д-принт", 2016. 80 с.
13. Состояние геологической среды (недр) на территории Сибирского федерального округа в 2017 г. Информационный бюллетень. Томск: Филиал "Сибирский региональный центр ГМСН", ФГБУ "Гидрогеология", 2018. Вып. 14. 178 с.
14. Экология микроорганизмов / Под ред. А.И. Нетрусова. М.: АКАДЕМА, 2004. 267 с.
15. *Manual on Stream Gauging*. Vol. I. Fieldwork. WMO. № 1044. Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization, 2010. 252 p.
16. Savichev O.G., Rudmin M.A., Mazurov A.K., Nalivaiko N.G., Sergienko V.I., Semiletov I.P. Mineralogical and geochemical features of peat deposit of eutrophic the Obskoye fen in anthropogenous conditions (the Western Siberia) // *Doklady Earth Sciences*, 2020. V. 492. P. 1. P. 320–322. <https://doi.org/10.1134/S1028334X20050219>
17. Shvartsev S.L. Geochemistry of fresh groundwater in main landscape zones of the earth // *Geochem. International*. 2008. V. 46. № 13. P. 1285–1398.

COMPOSITION OF RIVER WATER AND BOTTOM SEDIMENTS IN MINOR RIVERS UNDER ANTHROPOGENIC LOAD (BY THE EXAMPLE OF KISLOVKA RIVER, TOMSK)

**E. Yu. Pasechnik^{a,#}, O. G. Savichev^{a,##}, V. A. Domarenko^{a,###}, N. G. Nalivaiko^{a,####},
O. Yu. Goncharov^{b,#####}, N. A. Brovchenko^{a,#####}, and O. N. Vladimirova^{a,#####}**

^a National Research Tomsk Polytechnic University, Engineering school for natural resources,
pr. Lenina, 30, Tomsk, 634050 Russia

^b Tomskvodokanal Public Co., ul. Shevchenko, 41a, Tomsk, 634021 Russia

[#]E-mail: paseyu@yandex.ru

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

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

^{####}E-mail: nng@tpu.ru

^{#####}E-mail: goncharov@vodokanal.tomsk.ru

^{#####}E-mail: beautiful54@mail.ru

^{#####}E-mail: onv-2018@yandex.ru

A complex of field, laboratory (using ICP MS, powder X-ray diffractometry, scanning electron microscopy and microbiological analysis), and office research in revealing the matter composition distribution in bottom sediments and water of the Kislovka River near the city of Tomsk (Western Siberia, Kislovka–Tom–Ob river system) in the winter low-water period of 2020. It was found out that the maximal content of N and P compounds were confined to the places of domestic wastewater discharge; the maximal content of rare-earth el-

ements were confined to the relatively recently built-up areas of the catchment area, where the territory was backfilled with foreign soil; Fe and P compounds occur in the area of wastewater discharge from the iron removal station of the Tomsk underground water intake. The influence of the effluent discharge from the iron removal station of the Tomsk underground water intake can be traced in a section about 1 kilometer downstream of the discharge; and it decreases significantly within 5–6 kilometers downstream.

Keywords: *chemical, microbiological and mineral composition, bottom sediments, river water, Kislovka River, Tomsk, Western Siberia*

REFERENCES

1. GOST R 56060-2014. *Proizvodstvennyi ekologicheskii monitoring. Monitoring sostoyaniya i zagryazneniya okruzhayushchei sredy na territoriyakh ob'ektov razmeshcheniya otkhodov* [Industrial environmental monitoring. Monitoring of the state and pollution of the environment in the territories of waste disposal facilities]. Moscow, Standartinform Publ., 2015, 5 p. (in Russian)
2. Kolokolova, O.V. *Geokhimiya podzemnykh vod raiona Tomskogo vodozabara*. [Groundwater geochemistry of the Tomsk water intake area. Extended abstract of Cand. Sci. (Geol.-Min.) Dissertation. Tomsk, Tomsk Polytechnic Univ., 2003, 21 p. (in Russian)
3. Lisetskii, V.N., Bryukhantsev, V.N., Andreichenko A.A. *Ulavlivanie i utilizatsiya osadkov vodopodgotovki na vodozaborakh g. Tomsk* [Collection and disposal of water treatment sludge at Tomsk water intakes]. Tomsk, NTL Publ., 2003, 164 p. (in Russian)
4. L'gotin, V.A., Savichev, O.G., Nigorozhenko, V.Ya. *Sostoyanie poverkhnostnykh vodnykh ob'ektov, vodokhozyaistvennykh sistem i sooruzhenii na territorii Tomskoi oblasti v 2000-2005 gg.* [The state of surface water bodies, water management systems and structures in the Tomsk region in 2000–2005]. Tomsk, OAO Tomskgeomonitring, AGRAF-PRESS, 2006. № 88, 112 p. (in Russian)
5. Popov, V.K., Pasechnik, E.Yu., Protsenko, P.I., Goncharov, O.Yu. *Redkozemel'nye elementy v podzemnykh vodakh Tomskogo vodozabara* [Rare-earth elements in the groundwater of the Tomsk water intake]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov*. 2018. V. 329. № 6. P. 97–105. (in Russian)
6. Rogov, G.M., Popov, V.K., Osipova, Ye.Yu. *Problemy ispol'zovaniya prirodnykh vod basseina reki Tomi dlya khozyaistvenno-pit'yevogo vodosnabzheniya* [Problems of using the natural water of the Tom River basin for household and drinking water supply]. Tomsk, Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering Publ., 2003, 218 p. (in Russian)
7. Savichev, O.G. *Vodnye resursy Tomskoi oblasti* [Water resources of the Tomsk region]. Tomsk: Tomsk Polytechnic University Publ., 2010, 248 p. (in Russian)
8. Savichev, O.G., Nalivaiko, N.G., Rudmin, M.A., Mazurov, A.K. *Mikrobiologicheskie usloviya raspredeleniya khimicheskikh elementov po glubine torfyanoi zalezhi v ekosistemakh vostochnoi chasti Vasyuganskogo bolota (Zapadnaya Sibir')* [Microbiological conditions for the distribution of chemical elements over the depth of peat deposits in the ecosystems of the eastern part of the Vasyugan bog (Western Siberia)]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov*. 2019. V. 330. № 9. P. 184–194. (in Russian)
9. Savichev, O.G., Domarenko, V.A., Peregudina, Ye.V., Lepokurova, O.Ye. *Transformatsiya mineral'nogo sostava donnykh otlozhenii ot istokov k ust'yam rek* [Transformation of the mineral composition of bottom sediments from sources to river mouths]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov*, 2018. V. 329. № 7. P. 43–56. (in Russian)
10. Soktoev, B.R., Rikhvanov, L.P., Baranovskaya, N.V., Zamana, L.V. et al. *Mineralogo-geokhimicheskie osobennosti istochnika Yamkun (Zabaikal'skii Krai)* [Mineralogical and geochemical features of the Yamkun spring (Trans-Baikal Territory)]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov*, 2019. V. 330. № 7. P. 43–56. (in Russian)
11. *Sostoyanie geologicheskoi sredy (nedr) territorii Tomskoi oblasti v 2014 g.* [The state of the geological environment (subsoil) of the Tomsk region in 2014]. Vol. 20. Tomsk, OOO D-print, 2015, 84 p. (in Russian)
12. *Sostoyanie geologicheskoi sredy (nedr) territorii Tomskoi oblasti v 2015 g.* [The state of the geological environment (subsoil) of the Tomsk region in 2015]. Vol. 21. Tomsk, OOO D-print, 2016, 80 p. (in Russian)
13. *Sostoyanie geologicheskoi sredy (nedr) na territorii Sibirskogo federal'nogo okruga v 2017 g.* *Informatsionnyi byulleten* [Condition of geological environment (bowels) in the territory of Siberian Federal District in 2017. News bulletin]. Tomsk, Filial Sibirskii regional'nyi tsentr GMSN, FGBU Gidropetsgeologiya, 2018. V. 14, 178 p. (in Russian)
14. *Ekologiya mikroorganizmov* [Ecology of microorganisms]. A.I. Netrusov, Ed., Moscow, AKADEMA Publ., 2004, 267 p. (in Russian)
15. *Manual on stream gauging. Vol. I. Fieldwork.* WMO. № 1044. Geneva, Switzerland, World Meteorological Organization, 2010, 252 p.
16. Savichev, O.G., Rudmin, M.A., Mazurov, A.K., Nalivaiko, N.G., Sergienko, V.I., Semiletov, I.P. *Mineralogical and geochemical features of peat deposit of eutrophic the Obskoye fen in anthropogenous conditions (the Western Siberia).* *Doklady Earth Sciences*, 2020. V. 492, part 1. P. 320–322.
17. Shvartsev, S.L. *Geochemistry of fresh groundwater in main landscape zones of the Earth.* *Geochem. International.*, 2008. V. 46. № 13. P. 1285–1398.

МЕТОДОЛОГИЯ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 504.054:543.621

ДИНАМИЧЕСКОЕ ЭКСТРАГИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ ПОЧВ ТЕХНОГЕННЫХ ЛАНДШАФТОВ

© 2021 г. Б. В. Дампилова^{1,*}, С. Г. Дорошкевич^{1,**}, О. К. Смирнова^{1,***}, П. С. Федотов^{2,****}

¹ Геологический институт Сибирского отделения РАН, ул. Сахьяновой, ба, Улан-Удэ, 670047 Россия

² Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН ул. Косыгина, 19, Москва, 119991 Россия

*E-mail: bdampilova@geo.stbur.ru

**E-mail: dorosh@ginst.ru

***E-mail: meta@ginst.ru

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

Поступила в редакцию 25.01.2021 г.

После доработки 10.03.2021 г.

Принята к публикации 15.03.2021 г.

Исследованы образцы почв, подвергшихся длительному воздействию кислых рудничных вод. Валовое содержание элементов в образцах превышает предельно допустимые концентрации и варьирует в широких пределах: для свинца — от 26.4 до 638 мг/кг, для меди — от 121 до 2266 мг/кг, для кадмия — от 6.7 до 50.6 мг/кг. Экстрагирование форм цинка, кадмия, меди, свинца, никеля, марганца, молибдена проведено в динамическом режиме в микроколонках по пятистадийной схеме фракционирования, с выделением обменной/водорастворимой, кислоторастворимой, легко восстанавливаемой, легко окисляемой и трудно восстанавливаемой форм. Микроколонки из фторопластового материала состоят из трех основных частей — центрального контейнера для образца и двух крышек с отверстиями для прокачивания реагента. Для предотвращения выноса образцов из микроколонки использованы мембранные фильтры с размером пор 0.8 мкм. Соответствие суммарного содержания элементов в экстрагируемых и остаточной фракциях их валовому содержанию свидетельствует об отсутствии потерь образцов при экстрагировании в микроколонках. Построены кривые элюирования элементов для наиболее подвижных и, следовательно, биологически доступных фракций. Показано, что для эффективного извлечения обменных/водорастворимых форм элементов необходимо 60 мл элюента, для кислоторастворимых форм — 120 мл. Выявлено высокое содержание цинка, марганца, свинца и кадмия в обменной/водорастворимой форме. Среднее количество цинка в данной фракции достигает 47.8%, марганца — 36.4%, свинца — 25.8% от валового содержания. Среднее содержание молибдена в обменной/водорастворимой фракции составляет 8.7%. Содержание подвижных форм элементов превышает соответствующие ПДК для почв в несколько раз: свинца до 5, никеля до 9, меди до 12, цинка до 23. Следовательно, данные элементы в исследуемых почвах представляют экологическую опасность для окружающей среды.

Ключевые слова: фракционирование, микроколонки, кривые элюирования, тяжелые металлы, техногенно загрязненные почвы

DOI: 10.31857/S0869780921030024

ВВЕДЕНИЕ

Метод последовательного экстрагирования первоначально был разработан для изучения потенциально опасных химических элементов в морских донных отложениях [13, 14]. Затем его начали применять для фракционирования токсичных элементов в почвах. Метод последовательного экстрагирования впервые был использован для фракционирования соединений меди в почвах Р.Г. Маклареном [15]. Позже данный метод использовался для фракционирования и других тяжелых металлов. Так, на основе метода Тессье [18] в Бюро по эталонам Европейской комис-

сии (Community Bureau of Reference, Institute for Reference Materials and Measurements) был разработан метод фракционирования BCR [19]. В настоящее время данный метод в Европе является стандартным для фракционирования соединений тяжелых металлов в донных отложениях, илах и почвах. Также используют другие схемы последовательного экстрагирования с применением различных реагентов, показывающих хорошую сходимость результатов для почв слабого и среднего уровня загрязнения [8, 11, 16, 17]. Сравнительный анализ содержания форм нахождения тяжелых металлов в сильно загрязненных почвах при ис-

пользовании различных методик выявляет значительную погрешность в полученных результатах [3].

Высокая эффективность извлечения элементов достигается при применении методик динамического экстрагирования элементов с использованием вращающихся спиральных колонок за счет динамического многоступенчатого процесса экстрагирования [9]. Альтернативой вращающимся спиральным колонкам при динамическом экстрагировании могут служить цилиндрические микроколонок [12]. Ранее нами для экстрагирования элементов из техногенно загрязненных почв с высоким уровнем загрязнения использовались метод ВСР [5] и методика динамического экстрагирования элементов с использованием вращающихся спиральных колонок [6]. При применении статического режима экстрагирования наблюдались потери образца при переносе его из пробирок в стаканы после центрифугирования для дальнейшего экстрагирования другим раствором.

В настоящей работе применен метод фракционирования элементов в режиме динамического экстрагирования с использованием цилиндрических микроколонок для определения форм нахождения тяжелых металлов в сильно загрязненных почвах. Почвы техногенного участка разгрузки рудничных вод расположены у штольни Западная Холтосонского месторождения (Бурятия). Месторождение представлено серией гюбнерит-сульфидно-кварцевых жил. Содержание в руде основного компонента (WO_3) варьирует от 0.42 до 1.10%; отмечены повышенные концентрации элементов 1 и 2 классов опасности: Cd, Co, Ni и Cr [10]. Месторождение разрабатывалось подземным способом с 1939 г., вскрыто на глубину 540 м; законсервировано в 1997 г. Штольня Западная расположена на самом нижнем отработанном горизонте с абсолютной отметкой устья 1230 м. Из штольни изливаются рудничные воды (средняя скорость течения 0.2–0.4 м/с; дебит 15–18 л/с, pH 3.17–4.95, минерализация 2226–4153 мг/дм³), образующие несколько ручьев и дренирующие почвы прилегающей к штольне территории [7].

Цель исследования – определить формы нахождения элементов в техногенных почвах методом фракционирования элементов в режиме динамического экстрагирования с использованием цилиндрических микроколонок.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Пробы почв отобраны методом конверта со сторонами 20 м до глубины 10 см из верхнего генетического горизонта на техногенном участке разгрузки рудничных вод штольни Западная Холтосонского месторождения (Бурятия). Фракционирование форм элементов в почвенных об-

разцах проведено в динамическом режиме с использованием фторопластовой цилиндрической микроколонок. Микроколонок имеет внутренний объем около 1.5 мл, состоит из трех основных частей: центрального контейнера для образца и двух крышек, закрывающих контейнер с двух сторон, с отверстиями для прокачивания реагента. Масса анализируемых образцов – 0.25 г. Для предотвращения выноса образцов из микроколонок использовали мембранные фильтры с размером пор 0.8 мкм. Растворы экстрагентов прокачивали через микроколонок со скоростью 1.0 мл/мин с помощью перистальтического насоса ВТ100-1F. Объем отбираемых фракций составил 20 мл. Согласно схеме 5-стадийного последовательного экстрагирования [9] были выделены следующие фракции:

1) обменная/водорастворимая форма (ионы, связанные с матрицей образца слабыми электростатическими взаимодействиями; реагент – 0.05 М $Ca(NO_3)_2$);

2) кислоторастворимая форма (специфически сорбированные ионы; реагент – 0.43 М CH_3COOH);

3) легко восстанавливаемая форма (элементы, связанные с аморфными оксидами марганца; реагент – 0.1 М $NH_2OH \cdot HCl$);

4) легко окисляемая форма (элементы, связанные с органическими веществами; реагент – 0.1 М $K_4P_2O_7$, pH 11);

5) трудно восстанавливаемая форма (элементы, связанные с аморфными оксидами и слабо окристаллизованными оксидами железа и алюминия; реагент – 0.1 М $(NH_4)_2C_2O_4$, pH 3);

6) остаточная форма (элементы, связанные с кристаллической решеткой минералов).

Валовое содержание элементов (W, Pb, Zn, Cu, Ni, Mo, Cd, Mn, Fe) в пробах определялось на энергодисперсионном поляризационном рентгеновском спектрометре ЭДПРС-1; концентрация элементов в растворе – на масс-спектрометре с индуктивно связанной плазмой высокого разрешения Element XR Thermo scientific Fisher (“ЦКП “Аналитический центр минералого-геохимических и изотопных исследований” ГИН СО РАН”, г. Улан-Удэ).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Валовое содержание токсичных элементов в образцах почв участка разгрузки рудничных вод варьирует в широких пределах для свинца – от 26.4 до 638 мг/кг, меди – от 121 до 2266 мг/кг, кадмия – от 6.7 до 50.6 мг/кг (табл. 1). Как видно из представленных данных для образцов почв характерно высокое валовое содержание свинца (до 0.6 г/кг), цинка (до 1.1 г/кг), меди (до 2.3 г/кг),

марганца (до 2 г/кг), железа (до 224 г/кг). Согласно гигиеническому нормативу [4], предельно допустимая концентрация свинца в почве составляет 32 мг/кг. Максимальное превышение составляет до 19.9 ПДК в третьей пробе. Для других элементов ПДК по валовому содержанию в нормативном документе отсутствуют.

С целью определения объема элюентов, необходимого для извлечения подвижных (обменной/водорастворимой и кислоторастворимой) фракций каждого элемента, были построены кривые экстрагирования элементов из образца № 1 (рис. 1).

Извлечение обменных/водорастворимых и кислоторастворимых форм молибдена, кадмия и меди происходит постепенно на протяжении всего процесса элюирования. Процесс элюирования Pb, Zn, Mn и Ni имеет характерные особенности. Извлечение обменных/водорастворимых форм свинца, цинка и марганца происходит практически сразу в первых порциях элюента. Экстрагирование обменной/водорастворимой формы никеля происходит с максимумом, соответствующим 40 мл объема элюента. Судя по характеру кривых, для извлечения обменных/водорастворимых форм данных элементов достаточно 60 мл элюента. Извлечение кислоторастворимой формы марганца идет постепенно в процессе элюирования, свинца и никеля – в начале и в конце элюирования постепенно с пиками на 80 и 60 мл соответственно; цинка – максимальное извлечение происходит в первой 20 мл порции элюента.

Для извлечения кислоторастворимых форм изученных элементов через образцы почвы с высоким уровнем загрязнения необходимо пропускать 120 мл элюента. Для выделения пяти фракций из одного образца требуется около 6 ч. При 8-часовом рабочем дне при наличии одного перистальтического насоса возможно обработать только одну пробу. Для сравнения экстрагирование трех фракций в статическом режиме по модифицированной схеме BCR занимает четверо суток, однако при этом возможно одновременно исследовать ряд проб.

Полученные результаты фракционирования форм тяжелых металлов в образцах представлены в табл. 2.

Содержание цинка, марганца, свинца и кадмия в обменной/водорастворимой форме преобладает во всех пробах и может быть представлено в виде ряда $Mo < Cu < Ni < Cd < Pb < Mn < Zn$. Среднее содержание цинка в пробах в 1-й фракции достигает 47.8%, марганца 36.4%, свинца 25.8% от валового содержания. Количество подвижных форм превышает ПДК в несколько раз: свинца до 5 (проба № 2), никеля до 9 (проба № 4), меди до 12 (проба № 2), цинка до 23 (проба № 6) [4].

Таблица 1. Валовое содержание потенциально опасных химических элементов в верхнем слое почвы техногенного участка разгрузки рудничных вод штольни Западная, мг/кг

№ образца	Элемент								
	Cd	Pb	Zn	Cu	Ni	W	Mo	Mn	Fe
1	6.7	26.4	562	121	197	129	14.2	606	31776
2	49.4	409	1152	1456	167	728	15.8	1619	223982
3	33.6	638	638	2266	59.2	392	17.2	2049	136902
4	24.0	278	507	1431	64.8	130	9.0	1010	49997
5	21.4	53.2	401	208	48.2	112	9.0	874	41810
6	50.6	72.6	934	714	95.4	146	10.4	1135	28658

12.3–14.2% от валового содержания меди, кадмия и свинца находятся в кислоторастворимой фракции. По сумме обменной/водорастворимой и кислоторастворимой фракций, являющихся доступными для растений, изученные потенциаль-

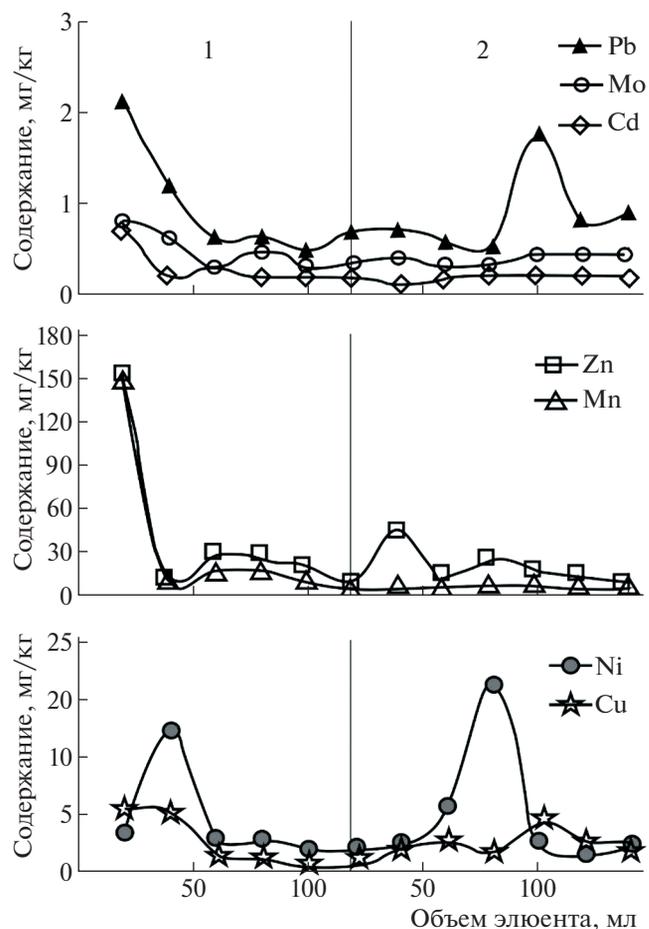


Рис. 1. Кривые экстрагирования подвижных форм тяжелых металлов из образца № 1: 1 – обменная/водорастворимая фракция, 2 – кислоторастворимая фракция.

Таблица 2. Распределение форм тяжелых металлов в верхнем слое почвы техногенного участка разгрузки рудничных вод штольни Западная, % от валового содержания

№ образца	Фракция	Элемент						
		Pb	Mo	Cd	Zn	Mn	Ni	Cu
1	1	27.3	19.7	26.9	44.2	34.4	12.7	11.4
	2	19.7	15.5	16.4	21.3	4.9	15.3	12.4
	3	5.3	5.6	11.9	3.8	1.6	1.5	3.0
	4	3.8	4.2	6.0	0.5	0.8	7.1	3.1
	5	10.6	11.3	9.0	9.5	15.3	2.6	18.1
	6	33.3	43.7	29.8	20.7	43.0	60.8	52.0
2	1	29.4	3.8	40.9	68.5	68.0	7.3	35.4
	2	22.7	2.5	7.3	4.6	4.3	0.6	9.8
	3	7.8	1.3	3.5	3.5	1.8	0.7	1.3
	4	1.1	2.5	1.9	1.9	0.8	0.7	2.2
	5	7.7	1.3	5.6	5.6	7.3	0.7	11.5
	6	31.3	88.6	24.2	15.9	17.8	90.0	39.8
3	1	8.5	3.5	20.2	18.1	6.5	4.1	20.0
	2	6.5	2.3	11.3	8.8	3.5	1.7	11.6
	3	5.3	2.3	10.7	7.6	27.9	2.0	2.6
	4	6.8	16.3	8.3	3.5	1.5	2.0	5.4
	5	9.2	11.6	14.3	4.8	10.6	2.0	11.2
	6	63.7	64.0	35.2	57.2	50.0	88.2	49.2
4	1	17.9	8.9	35.8	47.0	30.9	36.1	33.7
	2	13.8	6.7	14.2	6.4	1.9	2.2	20.8
	3	13.0	8.9	14.2	5.1	3.1	8.3	6.5
	4	10.2	24.4	11.7	3.8	0.8	2.2	9.2
	5	40.8	26.7	15.0	6.7	14.5	2.8	27.4
	6	4.3	24.4	9.1	31.0	48.8	48.4	2.4
5	1	11.7	8.9	15.9	37.0	11.1	10.0	5.4
	2	4.5	11.1	15.0	4.3	3.2	2.5	12.3
	3	6.0	15.6	15.9	4.4	11.4	2.9	6.9
	4	9.0	24.4	14.0	8.6	3.4	4.1	26.0
	5	44.4	31.1	18.7	18.9	27.2	10.4	27.7
	6	24.4	8.9	20.5	26.8	43.7	70.1	21.7
6	1	7.7	7.7	44.3	69.7	20.8	14.5	3.8
	2	6.3	9.6	19.0	8.0	3.8	5.2	18.4
	3	8.0	9.6	14.6	3.5	36.3	4.4	14.6
	4	36.1	28.8	6.3	4.9	6.9	23.3	40.5
	5	8.5	11.5	6.7	2.7	9.8	2.1	6.6
	6	33.4	32.8	9.1	11.2	22.4	50.5	16.1

но опасные химические элементы формируют следующий ряд (в порядке убывания подвижности): цинк – кадмий – медь – марганец – свинец – никель – молибден. Большое содержание подвижных форм обусловлено высокой кислотно-

стью рудничной воды, что способствует увеличению количества данных элементов в виде легко-растворимых соединений в почве.

Третья стадия фракционирования соответствует извлечению легко восстанавливаемых форм элементов, которые нестабильны в восстановительных условиях и при изменении окислительно-восстановительного потенциала среды становятся доступными для растений. К таким элементам относятся марганец и кадмий (в среднем 13.7% и 12.4% от валового содержания соответственно). В связи с тем, что данная фракция содержит элементы, связанные с аморфными оксидами марганца, при элюировании наблюдается повышенное выделение данного элемента (до 36.3% от валового содержания, проба № 6). В отдельных пробах в третьей фракции отмечено достаточно высокое содержание свинца (13.0% от валового содержания, проба № 4), молибдена (15.6% от валового содержания, проба № 5), меди (14.6% от валового содержания, проба № 6).

Легко окисляемая фракция соответствует металлам, связанным с органическим веществом почвы. Высокая вероятность хелатообразования отмечена для железа, марганца, меди, цинка, бора, кобальта, никеля, в связи с тем, что эти элементы легко образуют комплекс с органическими молекулами [2]. Доля потенциально опасных химических элементов участка разгрузки рудничных вод, связанных с органическим веществом, колеблется в широких пределах – от 0.5 до 40.5% от их валового содержания (см. табл. 2). В четвертой фракции наблюдается повышенное содержание (в % от валового содержания): молибдена – до 28.8 (в среднем 16.8), меди – до 40.5 (в среднем 14.4), свинца – до 36.1 (в среднем 11.2). Огромная роль в поглощении потенциально опасных химических элементов принадлежит и микроорганизмам, которые вызывают осаждение и концентрирование свинца, меди, железа, цинка и других металлов [1].

В труднодоступной форме (5 фракция) находятся элементы, связанные с аморфными и слабо окристаллизованными оксидами железа и алюминия. В этой фракции содержатся (в % от валового содержания): свинец – до 44.4 (в среднем 20.2), медь – до 27.7 (в среднем 17.1), молибден – до 31.1 (в среднем 15.6), марганец – до 27.2 (в среднем 14.1), кадмий – до 18.7 (в среднем 13.1), цинк – до 18.9 (в среднем 8.0), никель – до 10.4 (в среднем 3.4).

В остаточной фракции (№ 6) максимальное содержание обнаружено для никеля (48.4–90%). Сконцентрированные в остаточной фракции металлы инертны, для их перехода в активное состояние необходимы особые условия: изменение щелочно-кислотной и окислительно-восстановительной среды, температуры, деятельность жи-

вых организмов. Полученные результаты фракционирования были суммированы по каждому элементу и соотнесены с результатами валового анализа.

Соответствие валового содержания элементов и их суммарного содержания в экстрагируемых и остаточной фракциях позволяет сделать вывод о том, что в ходе фракционирования в динамическом режиме в микроколонках не происходит потери образца.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экстрагирование элементов в микроколонках имеет преимущества перед экстрагированием в статическом режиме. Во-первых, динамическое фракционирование позволяет проводить эксперименты без потерь образца. Во-вторых, постоянное обновление раствора экстрагента исключает реадсорбцию элементов. В-третьих, кривые элюирования наглядно показывают динамику извлечения элементов в каждую фракцию. Однако при рутинном анализе большого количества образцов фракционирование в динамическом режиме может уступать статическому экстрагированию.

Проведенные исследования по изучению форм нахождения элементов в почвах на техногенно загрязненной территории выявили, что наибольшей подвижностью обладают цинк, медь, никель и свинец. Данные элементы представляют экологическую опасность для окружающей среды.

Исследование выполнено в рамках государственного задания ГИН СО РАН по проекту № АААА-А21-121011890033-1 "Геоэкологические риски и экстремальные природные явления Сибири и Дальнего Востока"; работа проведена с использованием средств Центра коллективного пользования "Аналитического центра минералогических, геохимических и изотопных исследований" при ГИН СО РАН (Улан-Удэ, Россия).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Барабашева Е.Е., Стремещкая Е.О.* Роль микробиоты и органического вещества в процессах эндогенного и экзогенного рудообразования // Вестник ЧитГУ. 2010. № 6 (63). С. 83–89.
2. *Басков Е.А., Беленицкая Г.А., Романовский С.И. и др.* Литогеодиника и минерагения осадочных бассейнов. СПб.: ВСЕГЕИ, 1998. 480 с.
3. *Бурачевская М.В.* Фракционный состав соединений тяжелых металлов в черноземах обыкновенных нижнего Дона: дисс. ... канд. биол. наук. Воронеж, 2015. 214 с.
4. Гигиенические нормативы ГН 2.1.7.2041–06. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве. 2.1.7. Почва, очистка населенных мест, отходы производства и потребления, санитарная охрана почвы. 16 с.
5. *Дампилова Б.В., Смирнова О.К., Дорошкевич С.Г.* Тяжелые металлы в загрязненных почвах и хвостах обогащения руд сульфидно-вольфрамовых месторождений Забайкалья // Актуальные вопросы в области землеустройства, кадастров и природообустройства: проблемы и перспективы развития. Сб. матер. Междунар. науч.-практ. конф., посв. 20-летию кафедры землеустройства. Улан-Удэ: БНЦ СО РАН, 2016. С. 66–70.
6. *Дампилова Б.В., Федотов П.С., Дженлода Р.Х., Федюнина Н.Н., Карандашев В.К.* Сравнительное изучение методов оценки подвижности форм элементов в загрязненных почвах и техногенных песках в условиях статического и динамического экстрагирования // Журнал аналитической химии. 2017. Т. 72. № 10. С. 944–951.
7. *Дорошкевич С.Г., Смирнова О.К., Штарева А.В.* Оценка загрязненности территории, дренируемой рудничными водами сульфидно-вольфрамового месторождения (Западное Забайкалье) // Экология и промышленность России. 2017. Т. 21. № 6. С. 54–57.
8. *Ладонин Д.В.* Формы соединений тяжелых металлов в техногенно-загрязненных почвах: автореф. дисс. ... докт. биол. наук. М., 2016. 42 с.
9. *Савонина Е.Ю., Федотов П.С., Венрих Р.* Пятистадийное динамическое фракционирование форм меди, цинка и свинца в почвах, илах и донных отложениях с применением вращающихся спиральных колонок // Журнал аналитической химии. 2006. Т. 61. № 7. С. 759–766.
10. *Смирнова О.К., Плюсин А.М.* Джидинский рудный район (проблемы состояния окружающей среды). Улан-Удэ: БНЦ СО РАН, 2013. 181 с.
11. *Федотов П.С., Спиваков Б.Я.* Статические и динамические методы фракционирования форм элементов в почвах, илах и донных отложениях // Успехи химии. 2008. Т. 77. № 7. С. 690–703.
12. *Федотов П.С., Савонина Е.Ю., Спиваков Б.Я., Венрих Р.* Возможности гармонизации методов динамического фракционирования форм элементов в почвах и донных отложениях // Журнал аналитической химии. 2012. Т. 67. № 10. С. 948–958.
13. *Goldberg E., Arrhenius G.* Chemistry of Pacific pelagic sediments // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1958. V. 13. P. 153–212.
14. *Hirst D., Nicholls G.* Techniques in sedimentary geochemistry. 1. Separation of the detrital and nondetrital fractions of limestones // *Journal of Sedimentary Petrology*. 1958. V. 28. P. 468–481.
15. *McLaren R.G., Crawford D.V.* Studies on soil copper. I. The fractionation of copper in soils // *Journal of Soil Science*. 1973. V. 24. № 2. P. 172–181.
16. *Santos A., Santos J.L., Aparicio I, Alonso E.* Fractionation and Distribution of Metals in Guadiamar River Sediments (SW Spain) // *Water Air Soil Pollution*. 2010. V. 207. № 1–4. P. 103–113.
17. *Sutherland R.A.* BCR[®]-701: a review of 10-years of sequential extraction analyses // *Analytica Chimica Acta*. 2010. V. 680. P. 10–20.

18. Tessier A., Campbell P.G.C., Bisson M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals // *Analytical chemistry*. 1979. V. 51. №. 7. P. 844–850.
19. Whalley C., Grant A. Assessment of the phase selectivity of the European Community Bureau of Reference (BCR) sequential extraction procedure for metals in sediment // *Analytica Chimica Acta*. 1994. V. 61. P. 2211–2221.

DYNAMIC EXTRACTION OF ELEMENTS FROM SOILS IN TECHNOGENIC LANDSCAPES

B. V. Dampilova^{a,#}, S. G. Doroshkevich^{a,##}, O. K. Smirnova^{a,###}, and P. S. Fedotov^{b,####}

^a *Geological Institute, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, ul. Sakh'yanovoi, 6a, Ulan-Ude, 670047 Russia*

^b *Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry, Russian Academy of Sciences, ul. Kosygina, 19, Moscow, 670047 Russia*

[#] *E-mail: bdampilova@geo.stbur.ru*

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

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

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

Samples of soils exposed to long-term impact of acid mine waters were studied. The gross content of elements in the samples exceeds the maximum permissible concentrations and varies within wide limits: for lead - from 26.4 to 638 mg/kg, for copper - from 121 to 2266 mg/kg, for cadmium - from 6.7 to 50.6 mg/kg. Zinc, cadmium, copper, lead, nickel, manganese, and molybdenum forms were extracted in a dynamic mode in microcolumns according to a five-stage fractionation scheme, with the release of exchangeable/water-soluble, acid-soluble, easily reducible, easily oxidizable and hardly reducible forms. Microcolumns made of fluoroplastic consist of three main parts, i.e., a central container for the sample and two caps with holes for pumping the reagent. To prevent the removal of samples from the microcolumn, membrane filters with a pore size of 0.8 μm were used. The correspondence of the total content of elements in the extractable and residual fractions to their gross content indicates the absence of sample losses during extraction in microcolumns. Elution curves of elements were constructed for the most mobile and, therefore, biologically available fractions. It has been shown that for the effective extraction of exchangeable/water-soluble forms of elements, 60 ml of eluent is required, and for acid-soluble forms – 120 ml. A high content of zinc, manganese, lead and cadmium is revealed occurring in an exchangeable/water-soluble form. The average amount of zinc in this fraction reaches 47.8%, manganese – 36.4%, lead – 25.8% of the total content. The average content of molybdenum in the exchangeable/water-soluble fraction is 8.7%. The content of mobile forms of elements exceeds the corresponding MPCs for soils several times: lead up to 5, nickel up to 9, copper up to 12, zinc up to 23. Consequently, these elements in the studied soils pose hazard to the environment.

Keywords: *fractionation, microcolumns, elution curves, heavy metals, technogenically contaminated soils*

REFERENCES

- Barabasheva, E.E., Stremetskaya, E.O. *Rol' mikrobioty i organicheskogo veshchestva v protsessakh endogenno i ekzogenno rudoobrazovaniya* [The role of microbiota and organic matter in endogenic and exogenic ore formation]. *Vestnik ChitGU*, 2010. № 6 (63). P. 83–89. (in Russian)
- Baskov, E.A., Belenitskaya, G.A., Romanovskii, S.I., et al. *Litogeodinamika i minerageniya osadochnykh basseinov* [Lithogeodynamics and menarogenetic specifics of sedimentary basins]. St. Petersburg, VSEGEI Publ., 1998, 480 p. (in Russian)
- Burachevskaya, M.V. *Fraktsionnyi sostav soedinenii tyazhelykh metallov v chernozemakh obyknovennykh nizhnego Dona* [Fraction composition of heavy metal compounds in ordinary chernozems of the lower Don area]. Cand. Sci. (Biol.) Dissertation, 2015, 214 p. (in Russian)
- Gigienicheskie normativy GN 2.1.7.2041–06. Predel'no dopustimye kontsentratsii (PDK) khimicheskikh veshchestv v pochve. 2.1.7. Pochva, ochistka naseleennykh mest, otkhody proizvodstva i potrebleniya, sanitarnaya okhrana pochvy* [Hygienic standards GN 2.1.7.2041–06. Maximal permissible concentrations (MPC) of chemicals in soils. 2.1.7. Soil, purification of settlements, industrial and domestic waste, sanitary protection of soil]. 16 p. (in Russian)
- Dampilova, B.V., Smirnova, O.K., Doroshkevich, S.G. *Tyazhelye metally v zagryaznennykh pochvakh i khvostakh obogashcheniya rud sul'fidno-vol'framovykh mestorozhdenii Zabaykal'ya* [Heavy metals in contaminated soils and dressing tailings of sulfide-tungsten ores in Western TransBaikalian deposit]. *Materialy mezhdunarodnoi nauch.-prakt. konf.* [Proc. International Sci. and Pract. Conference]. Ulan-Ude, BNTs SO RAN, 2016. P. 66–70. (in Russian)
- Dampilova, B.V., Fedotov, P.S., Dzhendloda, R.K., Fedunina, N.N., Karandashev, V.K. *Sravnitel'noe izucheniye metodov otsenki podvizhnosti form elementov v zagryaznennykh pochvakh i tekhnogenykh peskakh v usloviyakh staticheskogo i dinamicheskogo ekstragirovaniya* [Comparative study of methods soil for evaluating the

- mobility of element species in contaminated soil and technogenic sand under batch and dynamic extraction]. *Zhurnal analiticheskoi khimii*, 2017. V. 72. № 10. P. 1113–1119. (in Russian)
7. Doroshkevich, S.G., Smirnova, O.K., Shtareva, A.V. *Otsenka zagryaznennosti territorii, dreniruemoi rudnichnymi vodami sul'fidno-vol'framovogo mestorozhdeniya (ZapadnoeZabaykal'e)* [Assessment of contamination in the area drained by sulfide-tungsten ore water (Western TransBaikalia)]. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*, 2017. V. 21. № 6. P. 54–57. (in Russian)
 8. Ladonin, D.V. *Formy soedinenii tyazhelykh metallov v tekhnogenno-zagryaznyonnykh pochvakh* [Forms of heavy-metal compounds in anthropogenically contaminated soils]. Extended abstract of Doctoral Sci. (Biol.) Dissertation. Moscow, 2016, 42 p. (in Russian)
 9. Savonina, E.Yu., Fedotov, P.S., Vennrikh, R. *Pyatistadiinoe dinamicheskoe fraktsionirovanie form medi, tsinka i svintsa v pochvakh, ilakh i donnykh otlozheniyakh s primeneniem vrashchayushikhysya spiral'nykh kolonok* [Five-step dynamic fractionation of copper, zinc, and lead species in soils, silts, and bottom sediments using rotating coiled columns]. *Zhurnal analiticheskoi khimii*, 2006. V. 61. № 7. P. 702–708. (in Russian)
 10. Smirnova, O.K., Plyusnin, A.M. *Dzhidinskii rudnyi raion (problemy sostoyaniya okruzhayushchei sredy)* [Dzhidinskii ore district (problems in the environment state)]. Ulan-Ude, BNTs SO RAN, 2013, 181 p. (in Russian)
 11. Fedotov, P.S., Spivakov, B.Ya. *Sticheskie i dinamicheskie metody fraktsionirovaniya form elementov v pochvakh, ilakh, i donnykh otlozheniyakh* [Static and dynamic methods of fractioning element forms in soils, mud and bottom deposits]. *Uspekhi khimii*, 2008. V. 77. № 7. P. 690–703. (in Russian)
 12. Fedotov, P.S., Savonina, E.Yu., Spivakov, B.Ya., Vennrikh, R. *Vozmozhnosti garmonizatsii metodov dinamicheskogo fraktsionirovaniya form elementov v pochvakh i donnykh otlozheniyakh* [Possibilities for the harmonization of methods of the dynamic fractionation of elements in soils and bottom sediments]. *Zhurnal analiticheskoi khimii*, 2012. V. 67. № 10. P. 851–861. (in Russian)
 13. Goldberg, E., Arrhenius, G. Chemistry of Pacific pelagic sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1958. V. 13. P. 153–212.
 14. Hirst, D., Nicholls, G. Techniques in sedimentary geochemistry. 1. Separation of the detrital and nondetrital fractions of limestones. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1958. V. 28. P. 468–481.
 15. McLaren, R.G., Crawford, D.V. Studies on soil copper. I. The fractionation of copper in soils. *Journal of Soil Science*, 1973. V. 24. № 2. P. 172–181.
 16. Santos, A., Santos, J.L., Aparicio, I., Alonso, E. Fractionation and distribution of metals in Guadiamar river sediments (SW Spain). *Water Air Soil Pollution*, 2010. V. 207. № 1–4. P. 103–113.
 17. Sutherland, R.A. BCR[®]-701: a review of 10-years of sequential extraction analyses. *Analytica Chimica Acta*, 2010. V. 680. P. 10–20.
 18. Tessier, A., Campbell, P.G.C., Bisson, M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals. *Analytical chemistry*, 1979. V. 51. № 7. P. 844–850.
 19. Whalley, C., Grant, A. Assessment of the phase selectivity of the European Community Bureau of Reference (BCR) sequential extraction procedure for metals in sediment. *Analytica Chimica Acta*, 1994. V. 61. P. 2211–2221.