

ISSN 0869-7809

Номер 2

Март - Апрель 2023



ГЕОЭКОЛОГИЯ

*Инженерная геология
Гидрогеология
Геокриология*

www.sciencejournals.ru



СОДЕРЖАНИЕ

Номер 2, 2023

Формирование гидрогеологических условий Челябинского угольного бассейна на постэксплуатационном этапе

*Л. С. Рыбникова, П. А. Рыбников, А. Ю. Смирнов, И. В. Галицкая,
Г. И. Батрак, О. В. Лысенко, В. С. Пономарев*

3

ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ ПРИРОДНЫХ И ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Геоэкологические проблемы благоустройства исторических городов и задачи сохранности историко-градостроительного наследия

Е. Л. Беляева, П. И. Кашиперюк, Б. Г. Могинов, И. П. Резяпкин

19

Влияние тектонических узлов севера Русской плиты на состояние окружающей среды на микроуровне (на примере содержания аскорбиновой кислоты в плодах черники и брусники)

*В. В. Старицын, Ю. Г. Кутинов, Е. В. Полякова, З. Б. Чистова,
А. Л. Минеев*

31

Перспективы использования многолетнемерзлых пород Далдынского кимберлитового поля для закачки дренажных вод трубок Зарница и Удачная

А. М. Янников

43

ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

Оценка эволюции морфологической структуры термокарстовых равнин криолитозоны в связи с климатическими изменениями по материалам космической съемки

*А. С. Викторов, М. В. Архипова, В. Н. Капралова, Т. В. Орлов,
О. Н. Трапезникова*

56

Геохимия и условия формирования состава подземных вод в области развития мезозойских отложений в Республике Татарстан

Р. Х. Мусин, А. Д. Хамитов, З. Г. Калкаманова

67

ЗАГРЯЗНЕНИЕ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

Оценка загрязнения донных отложений малых рек Владимирской области

С. М. Чеснокова, О. В. Савельев

82

МЕТОДОЛОГИЯ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Математическая модель расчета рекреационной нагрузки на городские озелененные территории

О. Н. Дьячкова, А. Е. Михайлов

90

Contents

Number 2, 2023

Formation of hydrogeological conditions of the Chelyabinsk coal basin
at the post-operational stage

*L. S. Rybnikova, P. A. Rybnikov, A. Yu. Smirnov, I. V. Galitskaya,
G. I. Batrak, O. V. Lysenko, and V. S. Ponomarev*

3

FUNCTIONING OF NATURAL AND NATURAL ANTHROPOGENIC SYSTEMS

Geocological problems upon improvement of historic cities and preservation
of historic urban heritage

E. L. Belyaeva, P. I. Kashperuk, B. G. Moginov, and I. P. Rezyapkin

19

Influence of the tectonic knots in the north of the Russian Plate on the environment
state at the microlevel (by the example of the content of ascorbic acid in blueberry
and cowberry fruits)

*V. V. Staritsyn, Yu. G. Kutinov, E. V. Polyakova, Z. B. Chistova,
and A. L. Mineev*

31

Prospects for the use of permafrost at the Daldynskoe kimberlite field for injection
of drainage water from Zarntitsa and Udachnaya diamond pipes

A. M. Yannikov

43

NATURAL AND TECHNONATURAL PROCESSES

Evaluation of climate-induced evolution of the morphological structure of thermokarst
plains in the permafrost zone using remote sensing data

*A. S. Viktorov, M. V. Arkhipova, V. N. Kapralova, T. V. Orlov,
and O. N. Trapeznikova*

56

Geochemistry and formation conditions of groundwater composition in the area
of Mesozoic sedimentary cover in Tatarstan

R. Kh. Musin, A. D. Khamitov, and Z. G. Kalkamanova

67

ENVIRONMENT CONTAMINATION

Assessment of bottom sedimentary pollution in small rivers, Vladimir region

S. M. Chesnokova, O. V. Savel'ev

82

RESEARCH METHODS AND TECHNIQUES

Mathematical model for calculation of recreational load on green open space in a city

O. N. D'yachkova, A. E. Mikhailov

90

УДК 622.7.017

ФОРМИРОВАНИЕ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ЧЕЛЯБИНСКОГО УГОЛЬНОГО БАСЕЙНА НА ПОСТЭКСПЛУАТАЦИОННОМ ЭТАПЕ

© 2023 г. Л. С. Рыбникова^{1,*}, П. А. Рыбников^{1,**}, А. Ю. Смирнов^{1,***}, И. В. Галицкая^{2,****},
Г. И. Батрак^{2,3,*****}, О. В. Лысенко^{3,*****}, В. С. Пономарев^{3,*****}

¹Институт горного дела УрО РАН,
ул. Мамина-Сибиряка, 58, Екатеринбург, 620075 Россия

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

³Федеральное государственное бюджетное учреждение по вопросам реорганизации
и ликвидации нерентабельных шахт и разрезов,
Огородный проезд, 5, стр. 6, Москва 127254, Россия

*E-mail: luserib@mail.ru

**E-mail: ribnikoff@yandex.ru

***E-mail: alexsm94@gmail.com

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

*****E-mail: gib74@mail.ru

*****E-mail: lov@gursh.ru

*****E-mail: pvs@gursh.ru

Поступила в редакцию 10.01.2023 г.

После доработки 10.01.2023 г.

Принята к публикации 27.01.2023 г.

Завершение отработки месторождений полезных ископаемых приводит к необходимости разработки новых методов управления территориями, нарушенными в ходе горных работ. Закрытие горнодобывающих объектов, особенно имеющих длительную историю отработки, является причиной формирования сложной экологической обстановки. Освоение месторождений сопровождается дренажными мероприятиями, которые приводят к изменению баланса и структуры потоков поверхностных и подземных вод, к влиянию новых агентов на качественный состав гидросферы. Использование при отработке схем с обрушением кровли выработанного пространства провоцирует развитие геомеханических процессов, вследствие которых формируются зоны обрушения и сдвижения, сопровождающиеся нарушениями земной поверхности. Прекращение эксплуатации рудника означает остановку водоотлива, что приводит к постепенному заполнению депрессионной воронки, формированию участков подтопления и выходов шахтных вод на поверхность. Неустойчивые породы в бортах карьеров, на которых и при водоотливе были оползни, при подъеме уровня воды становятся особо опасными участками. Учитывая, что зачастую селитебная и промышленная застройка исторически располагается в непосредственной близости от рудников (иногда даже в пределах горного отвода), гидрогеоэкологические проблемы старопромышленных районов на постэксплуатационном этапе очень обостряются. При этом во многих случаях трудно определить, какие именно факторы: природные (особенности геологического строения, геоморфологические условия, водность периода) или техногенные (прекращение водоотлива), являются ответственными за подтопление территории, особенно на тех участках, которые находятся на значительном расстоянии от объектов завершённой отработки. Это порождает многочисленные спекуляции и приводит к нерациональным техническим решениям. На примере Челябинского угольного бассейна рассмотрены эколого-гидрогеологические проблемы, возникшие после завершения его отработки и прекращения водоотлива. Предложены мероприятия по снижению их негативного влияния на гидрогеоэкологические условия территории.

Ключевые слова: гидрогеологические условия, геоэкологические проблемы, водоотлив, дренаж, затопление, подтопление, угольные месторождения, оползень, утечки, водонесущие коммуникации, котловинно-бугристый рельеф

DOI: 10.31857/S0869780923020078, EDN: TWOEKS

ВВЕДЕНИЕ

В предыдущие десятилетия завершилась отработка многих месторождений полезных ископаемых месторождений как в мире, так и в России. Независимо от состояния горных работ наравне с задачами развития горной промышленности все более актуальными становятся не только проблемы ликвидации нерентабельных предприятий, но и вопросы управления опасностями в районах, где горнодобывающая деятельность уже не ведется. Это привело к необходимости предотвращения экологических рисков на территориях, нарушенных многолетними горными работами, проведение их реабилитации, организации процесса затопления и его мониторинга [4, 7, 8, 10, 11, 13, 15, 17, 25].

После завершения горнодобывающей деятельности с серьезными проблемами столкнулись старопромышленные районы Европы. Так, в 1992 г. после 800 лет эксплуатации были прекращены горные работы в регионах с большой плотностью отработанных угольных шахт и населения (Aachen, Германия и South-Limburg, Нидерланды), воронка депрессии площадью около 400 км² заполнилась за несколько лет, уровень подземных вод поднялся на 200–240 м [26].

В 2012 г. была прекращена добыча каменного угля на территории Saarland, Германия, насчитывающей 200-летнюю историю добычи. Завершена отработка Рурского каменноугольного бассейна, где уголь добывался с XII в. Обеспечение безопасного процесса затопления подземных выработок и ликвидации их негативных последствий требует больших финансовых затрат [22].

Триста лет угледобычи в бассейне Durham (Англия) привели к осушению водоносных горизонтов на огромных площадях. Прекращение водоотлива и заполнение депрессионной воронки могли спровоцировать многочисленные негативные последствия, в том числе: загрязнение питьевых водозаборов подземных вод; подтопление отвалов, отстойников; их активное выщелачивание и др. Для поддержания уровня шахтных вод ниже продуктивного водоносного горизонта (Basal Permian Sands), предотвращения их выхода на поверхность осуществляются откачка и очистка шахтных вод на специально построенном заводе производительностью около 15 тыс. м³/сут [27].

Отработанные горные объекты в США являются самыми крупными и дорогостоящими, на которых Агентство по охране окружающей среды (US EPA) проводит многолетние широкомасштабные реабилитационные работы за счет средств Суперфонда¹ [24].

¹ Закон о всесторонней ответственности и возмещении ущерба окружающей среде, известный также как Программа Суперфонда, был принят Конгрессом США в 1980 г.

В 1993–1994 гг. в России началась реструктуризация угольной отрасли, в процессе которой ликвидировано 203 угледобывающих предприятия, из них 188 шахт и 15 разрезов [9].

Вопреки ожидавшимся сценариям развития негативных последствий закрытия и затопления угольных шахт в различных угольных бассейнах России, многие вызванные ими явления оказались более длительными и нестабильными. В Кузнецком и Донецком угольных бассейнах значительные территории были подтоплены; загрязнены и выведены из строя питьевые водозаборы; наблюдаются выходы токсичных газов и просадки земной поверхности [1, 6, 12, 14]. После закрытия шахт Кизеловского бурогоугольного бассейна сформировалось 16 изливов кислых шахтных вод, которые без очистки поступают в бассейны рек Чусовая, Косьва, Яйва, Вильва, загрязнение прослеживается до Камского водохранилища [5, 16, 18].

Месторождения Челябинского бурогоугольного бассейна были открыты в 1832 г., их промышленная разработка началась в 1907 г. Пик угледобычи пришелся на 1960 годы, в конце 1980 годов начался процесс закрытия шахт, к настоящему времени работа всех шахт и разрезов прекращена. К началу 1990 годов наиболее крупными шахтами были в г. Копейск “Красная горнячка”, “Центральная”, “Комсомольская”, “Капитальная”; в г. Коркино – “Коркинская” и разрез “Коркинский”, в г. Еманжелинск – шахтоуправление “Куллярское”. Наиболее проблемными по эколого-гидрогеологическим проявлениям к настоящему времени являются участки в районах бывших ш. “Красная горнячка”, разрезов “Копейский” и “Коркинский”.

Исторически сложилось так, что города Копейск (население около 150 тыс. чел.), Коркино (35 тыс. чел.) выросли на базе поселков, располагавшихся возле угольных шахт и разрезов; жилые зоны складывались хаотично, тяготея к вводимым в эксплуатацию шахтам. В настоящее время угледобывающие предприятия, как особо убыточные, закрыты, а шахтерские поселки остались.

Суммарный среднегодовой водоотлив достигал 2363 м³/час при глубине отработки до 510 м. Прекращение водоотлива приводит к постепенному заполнению депрессионных воронок и сопровождается заполнением зон обрушения, подъемом уровня воды в разрезах, подтоплением населенных пунктов и объектов инфраструктуры.

Цель работы – анализ развития гидрогеологической ситуации в пределах Челябинского угольного бассейна после завершения отработки шахт и разрезов.

Таблица 1. Сведения о глубинах отработки и величине водоотлива

Шахта, разрез	Глубина действующего горизонта, м	Приток воды, от-до/средний, м ³ /час	Коэффициент водообильности, м ³ /т	Период эксплуатации, годы
“Красная горнячка”	400	282–405/350	5.7	1930–2003
“Центральная”	475	181–234/203	2.8	1932–2006
Копейский	75–130	35–90/63	1.0	1981–2004
“Капитальная”	460	120–137/131	1.0	1942–2009
“Комсомольская”	510	248–516/368	6.6	1952–2008
“Октябрьская”	265	160–238/187	8.3	1958–1996
“Калачевская”	100	96–175/114	6.0	1953–2002
“Коркинская”	480	71–145/109	1.4	1947–2013
Коркинский	453	85–137/99	0.5	1934–2017
“Батуриная”	240	210–261/236	5.3	1941–1997
Батуриный	153–189	315–468/416	6.9	1941–2001
“Кульярская”	330	50–147/91	3.8	1955–1997

ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ

Челябинский буроугольный бассейн (ЧУБ) находится на восточном склоне Урала, на западной окраине Западно-Сибирской низменности, занимает площадь 1300 км². Он протягивается суживающейся к югу полосой на расстояние более 150 км. Максимальная ширина угленосной структуры 14 км, глубина до 4 км [3].

До 2006 г. разработка месторождений велась ОАО “Челябинскуголь”. После его банкротства и ликвидации имущественный комплекс предприятия был выкуплен ОАО “Челябинская угольная компания”. Оставшиеся запасы угля на конец XX в. составляли 523 млн т.

Максимальная глубина отработки составляла до 510 м на ш. “Комсомольская”, максимальный водоотлив из нее был до 516 м³/час (табл. 1). Шахтные воды при отработке сбрасывались в озера Курлады, Третье, Курочкино, р. Чумляк, болото Уламово.

За период 2005–2021 гг. среднее количество осадков составило 460 мм/год, минимальное – 281 мм/год (2021 г.) и максимальное – 588 мм/год (2014 г.).

Рельеф района представляет собой слабо всхолмленную лесостепную равнину, граничащую на западе с пенеблемом восточного склона Урала и плавно понижающуюся в направлении региональных дрен. Равнина осложнена мелкими буграми и блюдцеобразными котловинами, что придает местности мелкобугристый котловинный характер.

Район относится к Иртышскому бассейновому округу. Особенности гидрографии – чрезвычайно редкая речная сеть и обилие бессточных

озерных котловин площадью от долей гектара до нескольких десятков квадратных километров (рис. 1). По северной окраине бассейна протекает р. Миасс (среднегодовой расход 18 м³/с), на юге р. Увелка (11 м³/с). Остальные речки имеют непостоянный сток и теряются при впадении в заболоченные озерные котловины.

Согласно тектонической схеме, исследуемый район находится в пределах Восточно-Уральского синклиория. Сильно метаморфизированные и дислоцированные палеозойские породы этой зоны в виде ступенчатой системы сбросов и уступов погружаются под покров отложений Западно-Сибирской низменности.

По геологическому строению Челябинский бассейн представляет собой грабен среди палеозойских пород, заполненный нижнемезозойскими угленосными отложениями. Западный борт крутой почти вертикальный, глубина грабена от 1700 до 3500 м. Восточный борт более пологий, его глубина от 500 до 1500 м.

Угленосными являются отложения верхнего отдела триасовой системы (калачевская, козыревская и коркинская свиты мощностью 1600–3500 м) и нижнего отдела юрской системы (сугоякская свита мощностью 450–770 м). В основании разреза каждой из свит залегают базальные безугольные горизонты, в составе которых преобладают аллювиально-пролювиальные песчано-конгломератовые отложения мощностью от 100 до 400 м. Выше залегают угленосные части свит, где преобладают болотно-озерные фации, содержащие пласты угля различной мощности.

В районе распространены подземные воды 2 типов: пластовые воды покровных отложений (наносов) четвертичного, неогенового, палеоген-

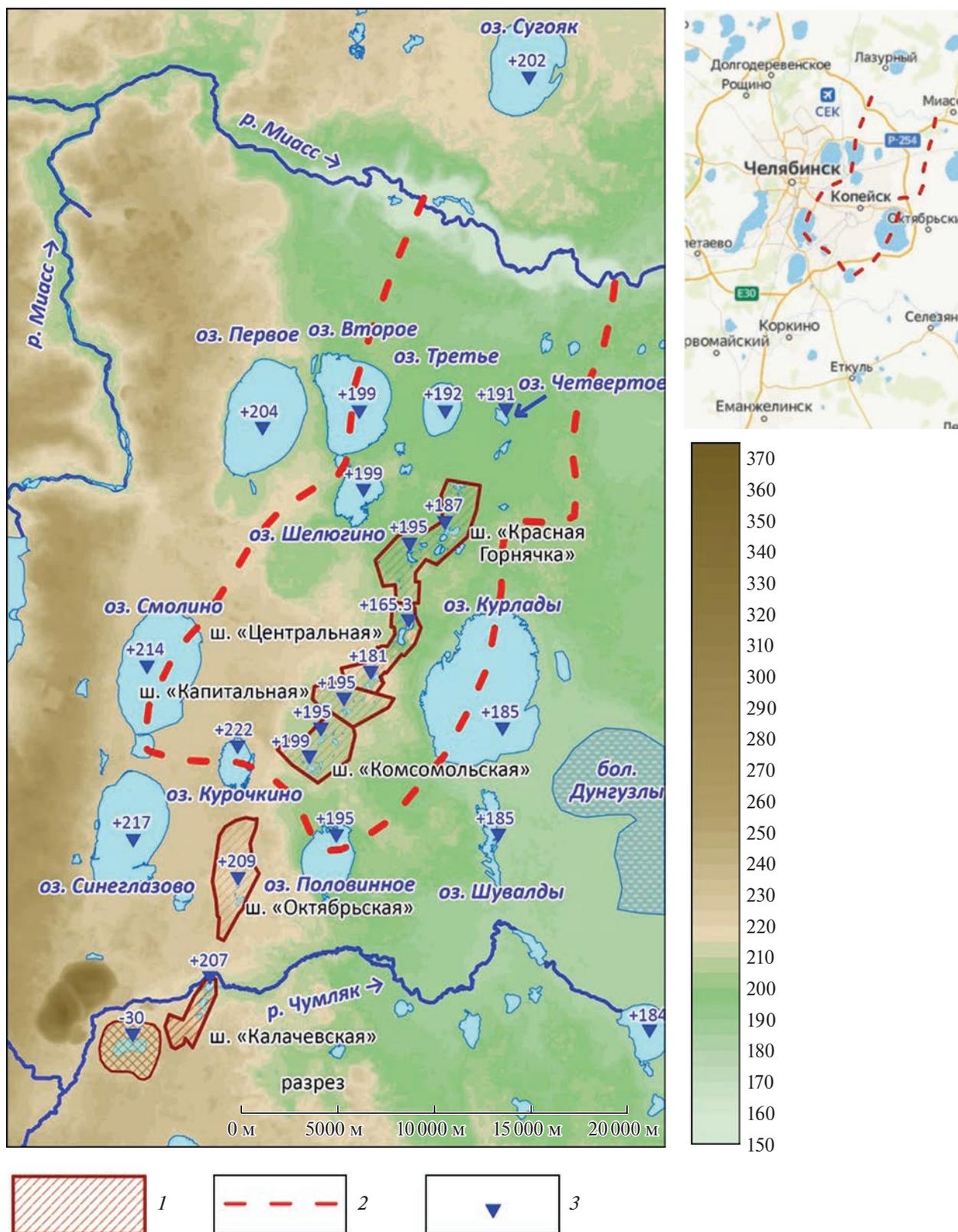


Рис. 1. Схема расположения шахтных полей и гидрографическая сеть района. 1 – горный отвод; 2 – граница водосборной площади шахт северной части ЧУБ (граница геофильтрационной модели); 3 – отметка уровня воды в водоемах.

нового, мелового возраста; трещинно-пластовые воды угленосной толщи юрского и верхнетриасового возраста.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Шахта “Красная горнячка”. Поверхность в границах горного отвода шахты “Красная горнячка” частично застроена частными жилыми домами поселков, здесь расположена селитебная застройка северо-восточной части г. Копейск. Севернее проходит автомобильная дорога Копейск-Вахрушево и Южно-Уральская железная дорога (рис. 2).

Водоотлив из ш. “Красная горнячка” был прекращен в июле 2003 г. Для предотвращения подтопления территории в 2004–2008 гг. был реализован ряд мероприятий: построены соединительная канава между озерами Третье и Четвертое (протяженностью 1.65 км) и водоотводной коллектор от оз. Четвертого до р. Миасс (диаметром 820 мм протяженностью 5 км); создана система дренажных канав, по которым вода поступает с затопленных участков в водоем карьера пласта VIII-2,3 (самую низкую часть горного отвода) и оттуда перекачивается в оз. Третье.

Начиная с 2004 г. на ряде угледобывающих предприятий, ликвидированных в рамках реструктуризации угольной промышленности, проводится мониторинг поверхностных и подземных вод, а также наблюдения за деформациями и движениями поверхности.

Проблемы подтопления северной части Копейского района, в том числе автомобильной и железной дорог, были связаны с подъемом уровня воды в озерах Третье и Четвертое. На протяжении многих десятилетий в оз. Третье сбрасывались шахтные воды (в год более 3 млн м³). Максимальный уровень воды в озерах Третье и Четвертое (194.2 м) наблюдался в 2002 г., тогда озера соединились.

К 2007 г. уровень воды в озерах понизился до абс. отм. 193 м, и проблема подтопления автомобильной и железной дорог была снята. В 2021 г. отметка уровня воды в оз. Третье составляла 190.9 м (проектная 192.6 м), в оз. Четвертое – 191.6 м (проектная 193.2 м) (рис. 3). Отметки воды в озерах на 1.6–1.7 м ниже проектных, и сброс воды из оз. Третье в оз. Четвертое не происходит. Площади озер существенно сократились, значительно ухудшилось качество воды в них.

Чтобы обеспечить наполняемость озер Третье и Четвертое, уровень воды в них нужно поднять до проектных отметок. Для этого необходимо 8.9 млн м³ воды (2.8 млн м³ для оз. Третье, и 6.1 млн м³ для оз. Четвертое). В настоящее время

в теплый период года откачивается порядка 600 тыс. м³, поэтому усыхание озер продолжится.

Уровень воды в карьере пласта VIII-2,3 достиг своего максимума (189.6 м) в весенний период 2019 г., была затоплена база отдыха и рыболовства, расположенная на берегу водоема (рис. 4). В июне 2019 г. начата откачка воды насосной станцией по водоводу в оз. Третье. К ноябрю 2019 г. уровень понизился на 3.5 м (до 186.1 м). Депрессионная воронка при откачке из карьера пласта VIII-2,3 имеет небольшие размеры. В наблюдательных скважинах на расстоянии более 1 км уровень подземных вод не реагирует на откачку и отражает естественный режим подземных вод.

Установившийся уровень воды в карьере VIII-2,3 при сохранении откачки в летний период составляет 187.5 м (сезонные колебания ± 1.0 м). Без такой откачки уровень стабилизируется на отметке 189.5 м.

На центральном и южном участках горного отвода процесс заполнения депрессионной воронки практически завершился (рис. 5). Глубина залегания уровня подземных вод изменяется 1.7 м от скв. 9-гн (на северной окраине пос. Новостройка) до 12.7 м в скв. 7-гн между озерами карьера пласта VIII-1,2 и Лесной склад.

Установившееся значение уровня воды в затопленных провалах и карьерах составляет от 192.2 м в провале шахты № 23 до 195.1 м в карьере пласта X (см. рис. 4).

На центральном и южном участках сохраняется стабильная гидрогеологическая обстановка. Для ее поддержания нет необходимости в создании новых систем водоотлива. Для исключения подтопления поверхности достаточно проводить надлежащее обслуживание дренажной системы.

Сочетание ряда факторов, таких как особенности геологического строения (наличие залегающей с поверхности толщи слабопроницаемых пород), геоморфологические условия (бугристо-впадинный котловинный тип рельефа) и повышенная водность периода (снеготаяние, обильные осадки), приводят формированию заболоченных участков, в том числе на территориях поселков. Размеры этих впадин от нескольких десятков до нескольких сот метров в диаметре, глубина от 1 до 6 м. Бугристо-котловинный рельеф аккумулирует в себя весь объем талых вод и атмосферных осадков и исключает их поверхностный сток. Так, например, на восточной окраине г. Копейск в районе пос. Горняк, в естественных понижениях развиты затопленные участки, которые расположены на водораздельных пространствах, находятся за пределами горного отвода, существовали и при работающем водоотливе (рис. 6). Местное население ошибочно связывает это с плохо проведенными работами по ликвидации шахт, считая, например, что: “...из-за расту-

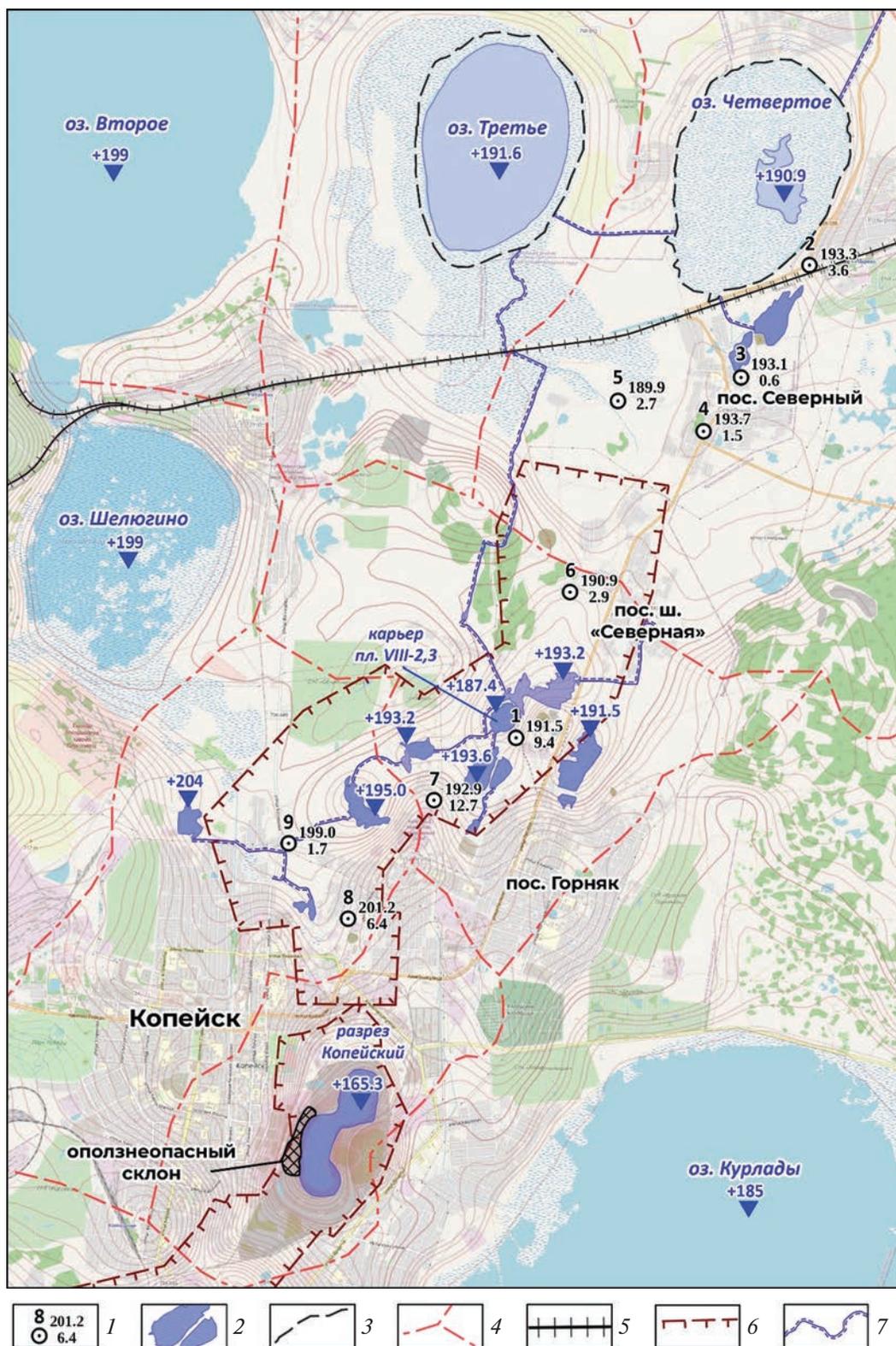


Рис. 2. Ситуационная схема и размещение техногенных объектов в районе ш. «Красная горнячка». 1 – наблюдательная скважина: сверху номер, справа: сверху абс. отм. уровня воды, внизу глубина до воды; 2 – затопленные карьеры и провалы; 3 – контур озер на 2003 г.; 4 – границы частных водосборов; 5 – железная дорога; 6 – граница горного отвода; 7 – дренажные канавы.

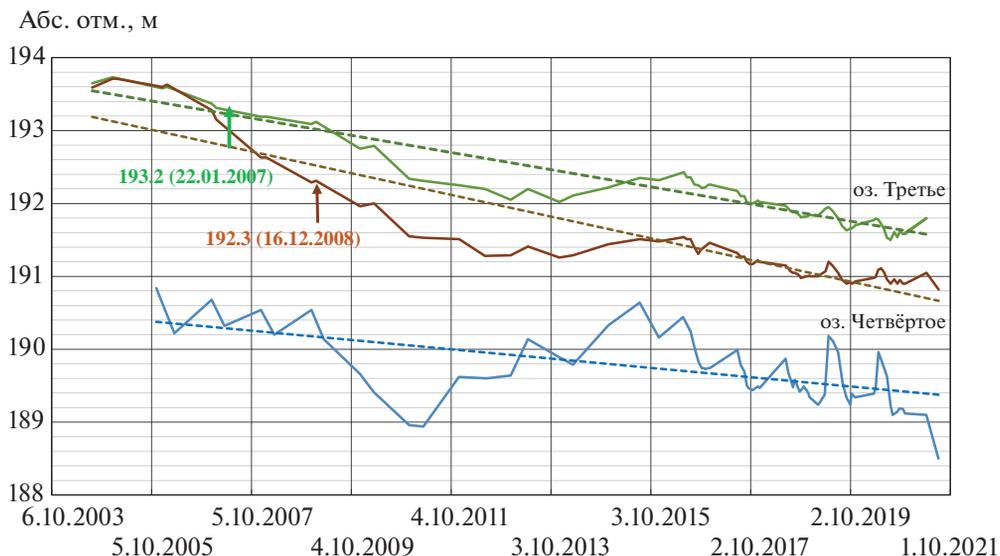


Рис. 3. Изменение уровней воды в озерах Третье, Четвертое и в скв. № 5-гн.

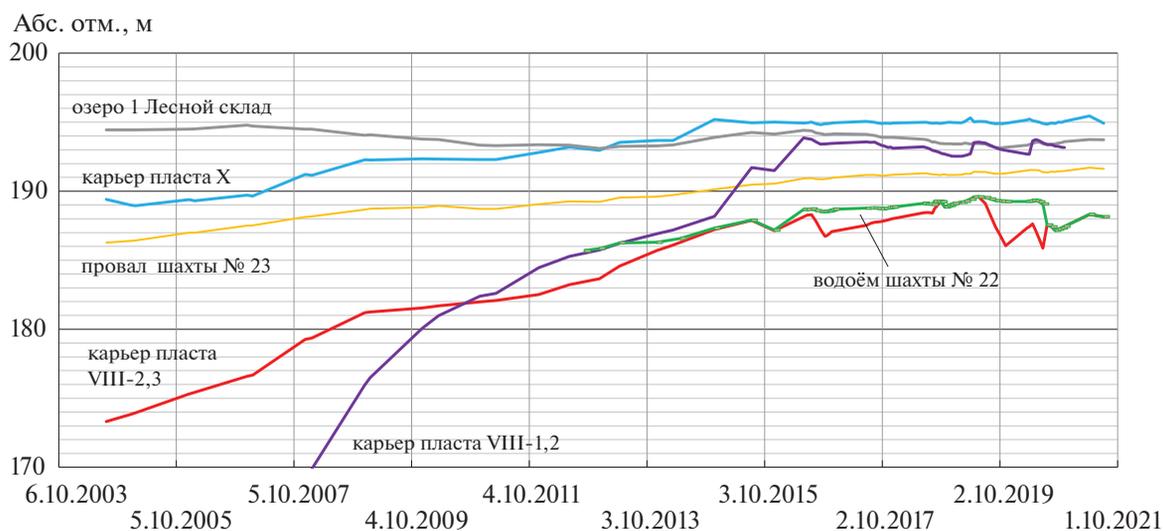


Рис. 4. Изменение уровней воды в карьерах и провалах.

щего уровня жидкости в выработке подтопленными оказались дома в поселке Горняк”^{2, 3}, хотя такие явления регулярно наблюдались и при работающих шахтах. Тогда в период снеготаяния и обильных осадков регулярно осуществлялась перекачка во-

ды в оз. Курлады, в настоящее время насосная установка не функционирует.

За период, прошедший после остановки шахтного водоотлива, количество и площадь заболоченных участков, формирующихся в естественных понижениях рельефа, не изменялись. Для предотвращения подтопления поселков в период снеготаяния и обильных осадков необходимо осуществлять откачку талых и дождевых вод из пониженных участков.

Разрез Копейский, шахта “Центральная”. Разрез Копейский затапливается с 2004 г., водоотлив из ш. “Центральная” прекращен в 2006 г. На за-

² На ликвидацию подтопления в Копейске выделено 10 млн руб. 10.04.2019. <https://kr-gazeta.ru/obshchestvo/NalikvidatsiyupodtopleniyavKopeyskeydeleno10mlnrublej/>.

³ Челябинский актив Струкова угрожает работе завода с тысячами сотрудников. 09.03.2022. <https://pravdaurfo.ru/polnotekst/384028-chelyabinskij-aktiv-strukova-ugrozaet-rabote-zavoda-s-tysyachami-sotrudnikov-minekologii-rt-otkazalov-rekultivaczii-broshennyh-shaht/>.

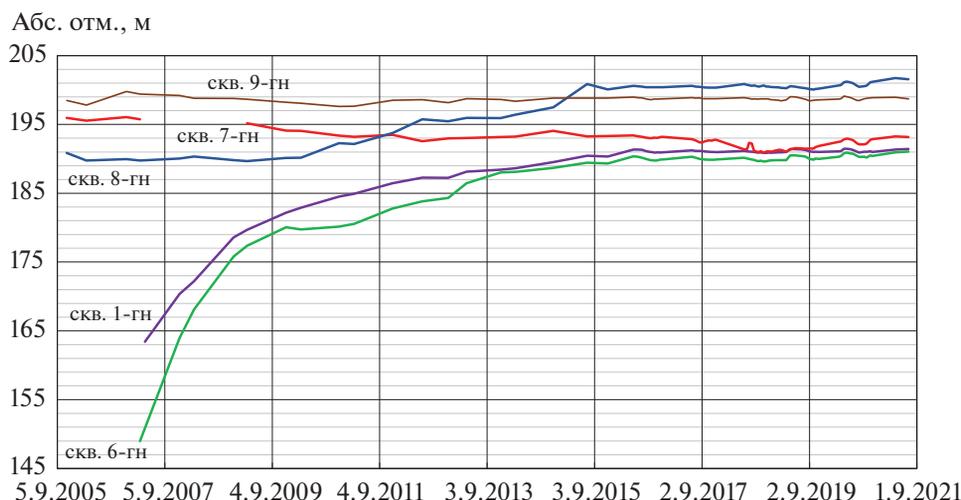


Рис. 5. Изменение уровней воды в скважинах в центральной (1-гн, 6-гн) и южной (7-гн, 8-гн, 9-гн) части шахтного поля “Красная горнячка”.

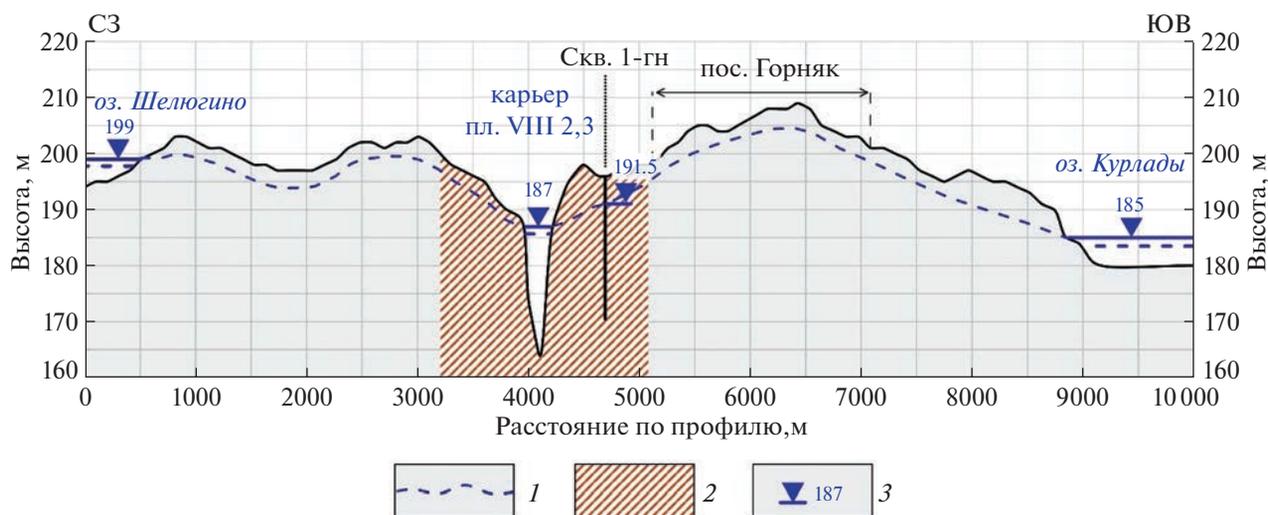


Рис. 6. Схематический разрез по линии оз. Шелюгино – оз. Курлады через озеро карьера пласта VIII-2, 3. 1 – уровень подземных вод; 2 – горный отвод ш. “Красная горнячка”; 3 – абсолютная отметка уровня воды.

падном борту разреза находятся промплощадка Копейского машиностроительного завода и селитебная территория г. Копейск. В процессе затопления на западном борту карьера произошло несколько оползней. После схода самого крупного оползня в 2015 г. дневная поверхность просела на 15 м вблизи территории Копейского машиностроительного завода. Весной 2019 г. откос оползневого участка был укреплен отсыпкой грунта. В настоящее время Уральский филиал ВНИМИ осуществляет геомеханический мониторинг; подвижки грунтовых реперов отсутствуют.

Подъем уровня воды в разрезе происходит значительно медленнее, чем на прибортовой полосе

и в стволе ш. “Центральная”, вследствие постоянного увеличения площади водного зеркала в формирующемся водоеме и за счет испарения, величина которого превышает в водном балансе величину выпадающих осадков.

Отметки дневной поверхности заводской территории повышаются от 203 м у бровки борта до 210 м. Глубина залегания уровня воды на середину 2021 г. варьировала от 15.8 до 20.7 м и устанавливалась на отметках 183.4–186.1 м. Подъем уровня подземных вод за период с апреля 2017 г. составил от 1.1 до 4.0 м. За этот же период уровень воды в карьере поднялся на 10.3 м от 158.5 м (12.07.2017) до 166.3 м (01.05.2021) (рис. 7). При этом в скв. № 2

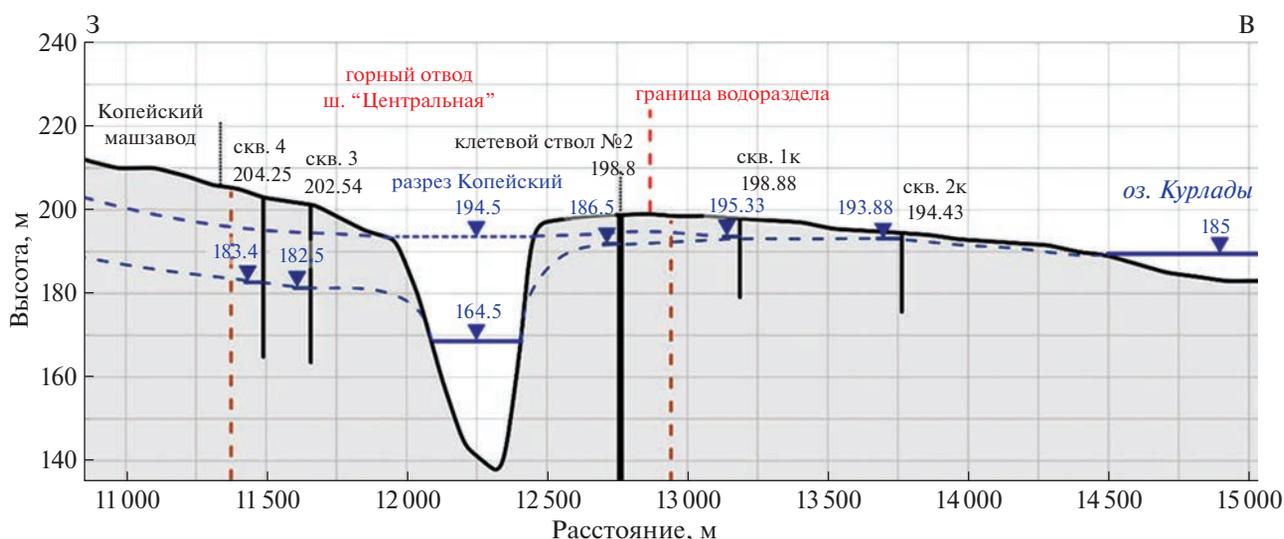


Рис. 7. Схематический разрез по линии Копейский машзавод – разрез Копейский – оз. Курлады.

уровень понизился на 1.0 м. Это произошло после остановки работы градири и прекращения утечек. Инфильтрация горячей воды, сбрасываемой на грунт, приводит к подтоплению территории и водонасыщению насыпной толщи на откосе борта, что может провоцировать дальнейшее развитие оползневых процессов. Необходимо полностью устранить утечки воды из водонесущих коммуникаций, прекратить сброс пароконденсата на оползневой участок.

Для оценки скорости затопления разреза Копейский была разработана геофильтрационная модель области его влияния. Границы модели определялись в соответствии с положением естественных водотоков и водоемов: на западе – оз. Смолино, на востоке – оз. Курлады, на севере – р. Миасс (см. рис. 1). Модель включала поля шахт “Красная горнячка”, “Центральная”, “Капитальная”, “Комсомольская”. Количество блоков по оси X 700, по оси Y 500, размер блока 50 × 50 м. Площадь модели 440 км². Численное фильтрационное моделирование выполнялось в программной среде Processing ModFlow 8 [23].

Модель двухпластовая: верхний пласт приурочен к наносам (эоцен-верхнемеловой водоносный горизонт), нижний к триас-юрским отложениям. Мощность первого пласта 50 м, второго 100 м. Коэффициенты фильтрации изменяются для верхнего пласта от 0.2 до 1 м/сут; для нижнего от 0.05 до 0.15 м/сут. Для корректного задания гипсометрии поверхности водоносных горизонтов использовалась цифровая модель рельефа. Величина модуля подземного стока принята равной 1.25 л/с с 1 км² на основании работ по оценке обеспеченности эксплуатационными запасами и ресурсами подземных вод населения Челябин-

ской области, обобщенных в дальнейшем для территории Уральского федерального округа и Российской Федерации [2].

Модель откалибрована по периоду отработки на момент стабильных шахтных водопритоков (решение в стационарной постановке). Для калибрации емкостных параметров, определяющих характер протекания нестационарного процесса затопления карьера, на модели был воспроизведен период затопления с 2010 по 2021 г.

Прогнозные задачи были направлены на оценку скорости затопления разреза “Копейский” при реализации 3 сценариев: 1) без проведения каких-либо мероприятий; 2) при проведении мероприятий по укреплению западного борта разреза (засыпка половины емкости разреза); 3) полная засыпка разреза (рис. 8а). Для определения влияния водности периода рассматривались 3 сценария (при условии засыпки половины емкости разреза): 1) 10 лет повышенной водности; 2) весь период затопления нормальной водности; 3) 10 лет низкой водности (рис. 8б).

Предельная величина затопления для всех сценариев одинаковая и составляет 194.5 м. Время затопления, отсчитываемое от 2021 г., составит 70 лет без проведения каких-либо мероприятий и 5 лет при полной засыпке разреза.

При проведении мероприятий по укреплению западного борта разреза (50% заполнения выработанного пространства) отметка воды в разрезе “Копейский” 194.5 м с вероятностью 70% будет достигнута через 25 лет. При сочетании неблагоприятных факторов (ряд лет высокой водности) эта отметка будет достигнута через 6 лет. В ситуации, если будет череда лет очень низкой водности

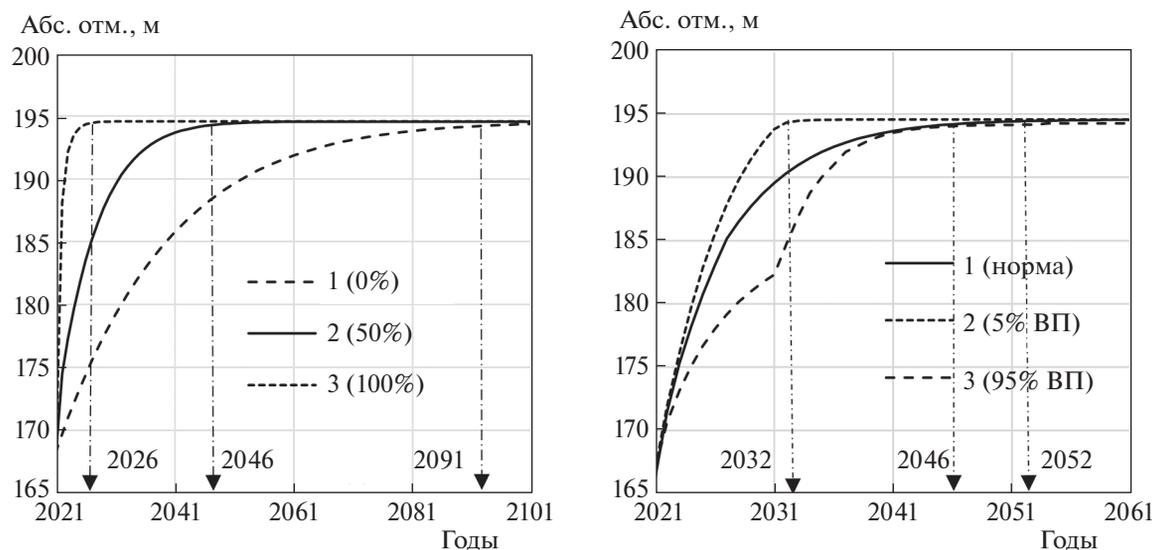


Рис. 8. Прогноз затопления Копейского разреза для разных сценариев, учитывающих: а – изменение степени заполнения выработанного пространства (1 – без засыпки, 2 – засыпка 50%, 3 – полная засыпка 100%); б – изменение водности (1 – нормальная водность, 2 – многоводный период 5% вероятность превышения (ВП) в течение 10 лет, 3 – маловодный период 95% ВП в течение 10 лет). Цифра у стрелки – год достижения предельной отметки.

(как, например, 2021 г.), затопление будет продолжаться 31 год.

Для исключения подтопления объектов поверхности на берегу оз. Курлады, расположенных на абсолютных отметках 193.0–195.0 м, необходимо поддержание уровня воды в затопленном разрезе не выше абсолютной отметки 190.0 м. Для этого необходимо откачивать порядка 1 млн м³ воды в год, реализовав следующие мероприятия: 1) оборудование плавучей насосной станции производительностью 220 м³/час в теплый период; 2) оборудование погружного водоотливного комплекса с производительностью 130 м³/час (для справки: расход водоотлива из шахты и разреза составлял 266 м³/час). Вода по напорному водоводу поднимается и следует до отстойника шахтных вод, использовавшегося при ведении добычных работ; сброс производится в дренажную канаву, идущую к оз. Курлады (в нее производился сброс шахтных вод при работающем водоотливе).

При условии ликвидации утечек из водонесущих коммуникаций и прекращения сброса воды на оползневой склон угрозы подтопления территории машзавода в настоящее время и в дальнейшей перспективе не существует [19].

Территория г. Копейск располагается на еще более высоких отметках, поэтому подтопление города никак не связано с затоплением разреза, а вызвано техногенными утечками из водонесущих коммуникаций. Общий объем подачи воды в Копейском городском поселении составляет 15.2 млн м³/год. Сетевые потери достигают 5.8 млн м³ (38%), что превышает суммарный водоотлив

шахт “Красная горнячка” и “Центральная”. Большой объем потерь воды вызван ветхостью сетей водоснабжения, износ которых больше 80% [21].

Шахты “Капитальная”, “Подозерная”, “Комсомольская”. К настоящему времени заполнение депрессионной воронки от шахтного водоотлива шахт “Капитальная”, “Подозерная”, “Комсомольская” практически завершилось. Новые участки подтопления за последние годы не обнаружены. В настоящее время и в дальнейшей перспективе подтопление территории поселков Бажово и Зуевка в результате прекращения шахтного водоотлива маловероятно. Организация водоотлива и проведение специальных мероприятий на площади горного отвода шахт “Капитальная”, “Подозерная” не требуется.

В южной части шахтного поля ш. “Комсомольская” проходит автомобильная дорога Бажово-Старокамьшинск, в 300 м южнее которой расположен карьер шахты 45. Рельеф территории имеет наклон от карьера в сторону дороги. Отметка поверхности воды в карьере превышает высотную отметку поверхности дорожного покрытия автомобильной дороги. Для обеспечения безопасной эксплуатации автомобильной дороги необходимо проложить дренажные канавы, соединяющие затопленные карьеры и понижения, и организовать спуск воды из карьера в существующую дренажную канаву и далее в оз. Курлады. При сезонной работе водоотлива в теплый период его производительность должна быть 68 м³/час.

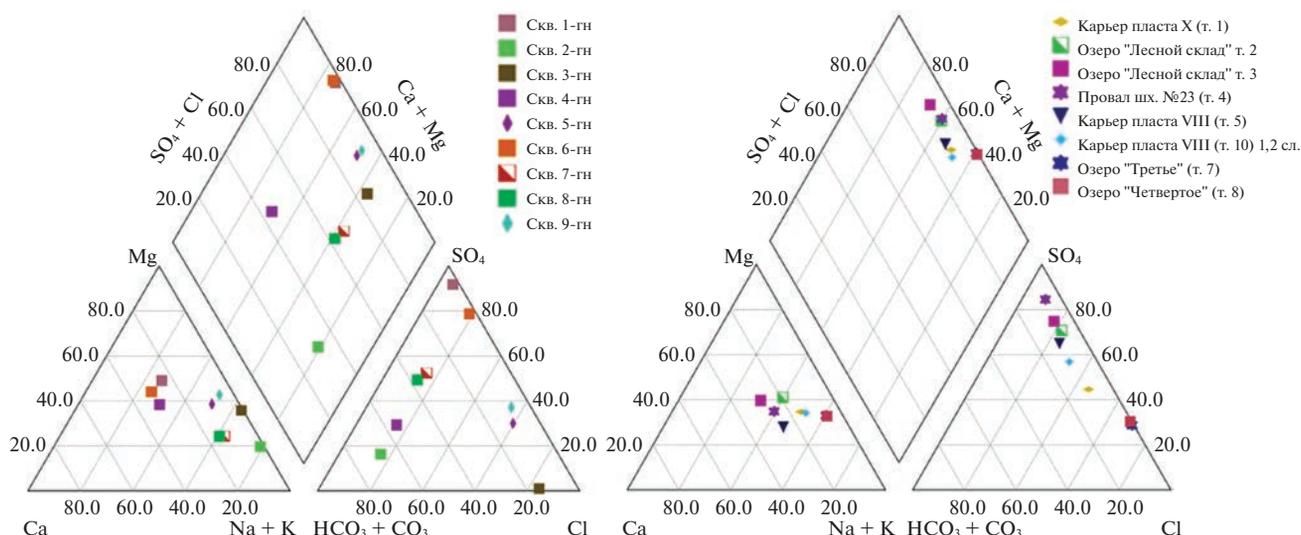


Рис. 9. Диаграмма Пайпера – состав подземных вод (а) и вод озер и затопленных карьеров (б).

Шахты “Октябрьская” и “Калачевская”. К настоящему времени заполнение депрессионной воронки от шахтного водоотлива ш. “Октябрьская” и “Калачевская” завершилось. Новые участки подтопления за последние годы не обнаружены, подтопление территории поселков Октябрьский и Роза маловероятно. Организация водоотлива и проведение специальных мероприятий не требуются.

Разрез Коркинский. Коркинский разрез – самый глубокий угольный разрез в Евразии, его глубина 493 м, длина по поверхности более 3 км, ширина свыше 2.5 км. За время разработки карьера в течение 70 лет было извлечено около 250 млн т угля и 1.5 млрд т грунта, объем выработки около 3 млрд м³. Разрез прекратил свою работу 20.11.2017 г. (эксплуатация началась в 1934 г.). Кроме открытых работ на Коркинском месторождении велись и подземные работы на ш. “Коркинская”. На 2005 г. промышленные запасы угля до глубины 630 м составляли 33 млн т, что могло обеспечить работой разрез на 23 года. Для этого надо было провести разнос бортов разреза, переселить жителей, перенести промплощадку и Коркинский экскаваторно-вагоноремонтный завод. Но активизировалось сдвижение бортов разреза (первый крупный оползень на северо-западном борту произошел в 1945 г.), стволы ш. “Коркинская” были признаны аварийными, начали разрушаться здания. Было принято решение о поэтапном закрытии разреза и переселении части жителей пос. Роза и г. Коркино. В бортах разреза регулярно фиксировались эндогенные пожары, что влияло не только на экологию г. Коркино, но и весь регион, включая г. Челябинск, страдал во время

попутных ветров от смога и едкого запаха горелого.

Для реализации проекта рекультивации Коркинского разреза создано ООО “Промрекультивация” (учредитель АО “Томинский ГОК”, входящее в группу Русской медной компании). Проект предусматривает заполнение горной выработки и ликвидацию зон самовозгорания закладочным материалом на основе хвостов обогатительной фабрики Томинского ГОКа, которые доставляются в разрез по трубопроводу протяженностью около 14 км [20]. За 5 лет было локализовано 556 тыс. м² зон самовозгорания. В результате выбросы снизились в 26 раз: с 950 т в 2017 г. до 36 т в 2021 г.⁴

Заполнение отработанной выработки закладочным материалом планируется завершить к 2045 г. К этому времени при отметке уровня воды +155 м в разрезе будет находиться 479 млн м³ закладочной смеси и 212 млн м³ воды⁵. Отметка затопления Коркинского разреза составит не более +210 м (судя по расположенной северо-западнее ш. “Калачевская”). При водопритоках подземных вод около 200 м³/час (см. табл. 1) время затопления разреза от отметки +155 м (площадь водной поверхности 4.7 км²) до отметки +220 м (площадь 7.4 км²) составит не менее 200 лет.

⁴ Выбросы на Коркинском угольном разрезе сократились в 26 раз. 10.11.2022 г. https://dostup1.ru/economics/Vybrosy-na-Korkinskom-ugolnom-razreze-sokratilis-v-26-raz_155972.html.

⁵ Проект ликвидации Коркинского угольного разреза. 27.11.2018. <https://www.youtube.com/@RussianCopperCompany>.

Состояние барьерных целиков и гидроизоляционных перемычек между шахтами

Между горными выработками шахт “Красная горнячка” (№ 20) и “Центральная” (7/8 и 4/6) существует гидравлическая взаимосвязь по пласту XI. В период работы шахты № 20 в сторону шахты “Центральная” отмечался незначительный (до 50 м³/час) переток воды через старые горные выработки шахты № 7/8. В настоящее время горные выработки по пласту XI шахты № 7/8 затоплены до отм. 183.5 м. Отметка затопления шахты № 20 выше — 190 м, соответственно, со стороны шахты № 20 возможны перетоки воды в сторону ш. “Центральная” через старые горные выработки шахты № 7/8.

С поля ш. “Центральная” через барьерный целик в районе Северо-Камышинского нарушения возможно незначительное поступление воды на ш. “Капитальная”.

С ш. “Капитальная” на ш. “Комсомольская” через прорезку целика Ж-3 возможно незначительное по величине поступление воды. На ш. “Комсомольская” возможны незначительные по величине водопитоки и с ш. “Подозерная” через междушахтный целик.

В настоящее время достигнутые отметки затопления по всей площади шахтных полей от ш. “Красная горнячка” до ш. “Комсомольская” составляют около 195 м. Прогнозная отметка затопления разреза Копейский 194.5 м.

Шахтные поля ш. “Октябрьская” и ш. “Калачевская” не “сбиты” между собой, расположены в другой площади водосбора, находятся на более высоких гипсометрических отметках и имеют уровень затопления 210 м.

Прогноз развития гидрогеохимической ситуации

На основании анализа трендов изменения минерализации и компонентного состава подземных вод в пределах горных отводов можно сделать вывод о постепенной стабилизации химического состава: максимальные значения минерализации подземных вод не превысят 3.0–3.7 г/дм³, сульфат-иона — 1.5–2.0 г/дм³, общей жесткости — 30 мг-экв/дм³ (рис. 9а). В поверхностных водах затопленных провалов, карьеров и разрезов ожидаемые значения показателей составят: минерализация 3.2–4.8 г/дм³, концентрация сульфат-иона 1.3–3.0 г/дм³, хлорид-иона до 0.5 г/дм³ (рис. 9б). Воды останутся очень жесткими (до 40 мг-экв/дм³), нейтральными или слабощелочными.

Наиболее сложная гидрохимическая ситуация сложилась в озерах Третье и Четвертое, питание которых осуществлялось за счет шахтного водоотлива. Воды озер характеризуются очень высо-

кой минерализацией (до 50 г/дм³), тип вод — хлоридный натриевый. Прослеживаются достаточно ясные тенденции увеличения минерализации, содержания сульфатов, хлоридов, натрия, магния, бора, лития, а в оз. Четвертое также увеличения содержания свинца, бария, алюминия, железа и ряда других микрокомпонентов. При дальнейшем испарении будет продолжаться концентрирование вод, сопровождаемое осаждением солей.

За длительный период эксплуатации питьевых водозаборов подземных вод не отмечено существенных изменений химического состава подземных вод, что свидетельствует об отсутствии влияния шахтных вод ликвидированных шахт.

Влияние затопления “Коркинского” разреза на подземные воды водозаборов также не прогнозируется. Прогнозное положение уровня воды в техногенном водоеме разреза после завершения его рекультивации в ближайшие три столетия будет находиться на отметках не выше +210 м, а вокруг разреза будет сохраняться депрессионная воронка. Это полностью исключает поступление воды из техногенного водоема “Коркинского” разреза в водоносные горизонты и ее подтягивание к подземным водозаборам.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Для предотвращения заболачивания северной части г. Копейск и поселков в начале 2000-х годов построена уникальная система водоотведения, не имеющая аналогов в России. Через насосную станцию и 20-километровую систему канав и отстойников вода, которая скапливается на территориях, нарушенных горными выработками, откачивается в р. Миасс. При надлежащем обслуживании дренажной системы и поддержании уровня воды в озере карьера пласта VIII-2,3 на уровне 180 м (в соответствии с проектом ликвидации ш. “Красная горнячка”) риск развития подтопления в результате прекращения водоотлива отсутствует.

2. Разрез “Копейский” до предельной отметки +194.5 м будет затапливаться до 2091 г. Для исключения подтопления объектов на его восточном борту целесообразно предусмотреть поддержание уровня воды в затопленном разрезе не выше абсолютной отметки 190.0 м. Горнопромышленная деятельность явилась не единственной и, более того, не основной причиной развития негативных гидрогеологических процессов подтопления на прилегающей территории и обводнения оползневого склона. При условии ликвидации утечек и прекращении сброса воды на оползневой склон угроза подтопления территории Копейского машинного завода маловероятна. Территория г. Копейск располагается на еще более высоких отметках, поэтому подтопление города

никак не связано с затоплением разреза, а вызвано техногенными утечками из водонесущих коммуникаций.

3. Рекультивация крупнейшего в Евразии “Коркинского” разреза осуществляется путем заполнения горной выработки закладочным материалом на основе хвостов обогатительной фабрики Томинского ГОКа, которые доставляются в разрез по трубопроводу. Заполнение отработанной выработки закладочным материалом планируется завершить к 2045 г. при отметке уровня воды +155 м. Окончательное затопление до отметки +210 м произойдет не раньше 2250 г.

4. Выявлены закономерности техногенного преобразования химического состава подземных и поверхностных вод после закрытия шахт. В подземных водах установлена стабилизация химического состава по наиболее значимым загрязняющим компонентам. В поверхностных водах выявлена дифференциация направленности процесса изменения химсостава: в техногенных водоемах в пределах бышей депрессионной воронки отмечена стабилизация на уровне регионального фона, в водоемах искусственного и смешенного генезиса прогнозируется ухудшение химического состава за счет испарительного концентрирования.

5. В результате всестороннего изучения и анализа гидрогеоэкологической ситуации на территории Челябинского угольного бассейна на качественном и частично на количественном уровнях выявлен вклад природной и техногенной составляющих в формирование экологических процессов на городской территории. Доказано, что причиной подтопления городской территории является геолого-геоморфологическое строение территории, выражающееся в наличии озер естественного происхождения и слабой дренированности территории.

6. Сочетание особенностей геологического строения с геоморфологическими условиями, гидрометеорологическими факторами и способом отработки приводит к формированию новых гидрогеоэкологических условий на постэксплуатационном этапе, продолжительность которого составляет десятки и даже сотни лет: с одной стороны, это образование техногенных водоемов, подтопление территорий и развитие оползневых процессов вследствие заполнения депрессионной воронки; с другой — высыхание озер, существовавших за счет шахтного водоотлива, и радикальное ухудшение качества воды в них.

Разделы статьи, связанные с методикой геофильтрационного моделирования, подготовлены в рамках выполнения государственного задания ИГД УрО РАН № 075-00412-22 ПР. Тема 2 (2022–2024) “Разработка геоинформационных технологий оценки защищенности горнопромышленных территорий и прогноза развития негативных процес-

сов в недропользовании” (FUWE-2022-0002) г. р. № 1021062010532-7-1.5.1 и при финансовой поддержке гранта ИАС РФ “Проведение фундаментальных научных исследований и поисковых научных исследований малыми отдельными научными группами” (тема № 22-27-20140).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барсуков И.В., Морин С.В. Экологические последствия затопления горных выработок на угольных месторождениях Урала // Изв. Вузов. Горный журнал. 2007. № 3. С. 64–71.
2. Боровский Б.В., Хачиян Т.П., Язвин А.Л. и др. Карта ресурсного потенциала пресных подземных вод России. Масштаб 1: 5 000 000. М.: ЗАО “ГИДЭК”, 2012.
3. Гидрогеология СССР. Т. XIV. Урал. Уральское территориальное геологическое управление. Редактор В.Ф. Прейс. М.: Недра, 1972. 648 с.
4. Гуман О.М., Петрова И.Г., Лапин С.Э. Особенности экологического мониторинга вблизи угольных шахт (на примере шахты “Центральная” Копейского района Челябинского угольного бассейна) // Геология и геофизика. 2001. № 13. С. 223–227.
5. Имайкин А.К., Имайкин К.К. Гидрогеологические условия Кизеловского угольного бассейна во время и после окончания его эксплуатации, прогноз их изменений. Пермь: ПГНИУ, 2013. 112 с.
6. Лангольф Э.Л., Лудзиш В.С., Лазаревич Т.И., Поляков А.Н. Актуальные проблемы освоения площадей горных отводов после затопления шахт Кузбасса // Маркшейдерский вестник. 2007. № 4. С. 45–48.
7. Методические указания по оценке гидрогеологических условий ликвидации угольных шахт, обоснованию мероприятий по управлению режимом подземных вод и обеспечению экологической безопасности. М: ИПКОН РАН, 1997. 24 с.
8. Методическое руководство по проектированию горно-экологического мониторинга при ликвидации шахт угольной отрасли РФ. М.: МЭ РФ, 2001. 79 с.
9. Моисеенков А.В. ФГБУ “ГУРШ” — двадцать лет спустя // Уголь. 2018. № 2. С. 36–39.
10. Мироненко В.А., Румынин В.Г. Проблемы гидрогеоэкологии. В 3-х томах. Т. 3 (книга 1). Прикладные исследования. М.: МГГУ, 1999. 313 с.
11. Мироненко В.А., Румынин В.Г. Проблемы гидрогеоэкологии. В 3-х томах. Т. 3 (книга 2). Прикладные исследования. М.: МГГУ, 1999. 504 с.
12. Морин С.В., Барсуков И.В. Вопросы оценки сдвижений и деформаций земной поверхности на ранее подработанных территориях угольных шахт // Сб. науч. тр. ВНИМИ. СПб. 2012. С. 237–245.
13. Норватов Ю.А., Петрова И.Б. Методическое руководство по прогнозу гидрогеологических условий ликвидации угольных шахт и обоснованию мероприятий, обеспечивающих предотвращение негативных экологических последствий. СПб.: ВНИМИ, 2008. 79 с.
14. Об экологических последствиях выполнения комплекса мероприятий по завершению реструктуризации угольной промышленности Восточного Донбасса на 2006–2010 годы. URL:

- <http://www.donland.ru/Default.aspx?pageid=88038>
(дата обращения: 12.12.2022).
15. Отраслевая инструкция о порядке ликвидации и консервации предприятий по добыче угля (сланца). М.: Минтопэнерго. 1997. 16 с.
 16. Рыбникова Л.С., Рыбников П.А. Гидрогеологические исследования в горном деле на постэксплуатационном этапе // Геоэкология. 2018. № 4. С. 25–39.
 17. Рыбникова Л.С., Рыбников П.А. Закономерности формирования качества подземных вод на отработанных медноколчеданных рудниках Левихинского рудного поля (Средний Урал, Россия) // Геохимия. 2019. Т. 64. № 3. С. 282–299.
 18. Рыбников П.А., Рыбникова Л.С., Максимович Н.Г., Деменев А.Д. Исследование гидрогеологических условий угольных месторождений на постэксплуатационном этапе с использованием гидродинамического моделирования (на примере Кизеловского угольного бассейна, Западный Урал, Россия) // ГИАБ. 2020. № 3.1. С. 488–500.
 19. СП 104.13330.2016. Инженерная защита территории от затопления и подтопления. Актуализированная редакция СНиП 2.06.15–85.
 20. Соколовский А.В., Лапаев В.Н., Темникова М.С., Гордеев А.И. Технологические особенности ликвидации разреза “Коркинский” // Уголь. 2018. № 3 (1104). С. 91–95.
 21. Схема водоснабжения и водоотведения муниципального образования “Копейский городской округ” Челябинской области до 2038 года. Копейск, 2018. 393 с. URL: <http://www.akgo74.ru>
 22. Элементы и аспекты постэксплуатационного периода горных предприятий / К. Мельхерс К., Кречманн Ю., Гёрке-Маллет П., Кляйнеберг К., Толленев М. // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2015. № 6 (112). С. 3–13.
 23. Anderson M.P., Woessner W.W. and Hunt R.J. Applied Groundwater Modeling Simulation of Flow and Advective Transport. Academic Press; Second Edition. 2015. 564 p.
 24. Global Acid Rock Drainage Guide. The International Network for Acid Prevention (INAP). 2014. 473 p.
 25. Rybnikova L.S., Rybnikov P.A. Pit Lake and Drinking Water Intake: Example of Coexistence (Middle Urals, Russia) // Mine Water and the Environment. 2020. P. 464–472.
 26. Wolkersdorfer C. Water management at abandoned flooded underground mines. Fundamentals. Tracer tests. Modelling. Water treatment. Springer, 2008. 465 p.
 27. Younger P.L., Jenkins D.A., Rees B., Robinson J. et al. Mine waters in Wales: pollution, risk management and remediation. Urban geology in Wales. National Museums and Galleries of Wales Geological Series. 2004. № 23. P. 138–154.

FORMATION OF HYDROGEOLOGICAL CONDITIONS OF THE CHELYABINSK COAL BASIN AT THE POST-OPERATIONAL STAGE

**L. S. Rybnikova^{a,#}, P. A. Rybnikov^{a,##}, A. Yu. Smirnov^{a,###}, I. V. Galitskaya^{b,####},
G. I. Batrak^{b,c,#####}, O. V. Lysenko^{c,#####}, and V. S. Ponomarev^{c,#####}**

^a*Institute of Mining, Ural Branch RAS,
ul. Mamina-Sibiryaka 58, Yekaterinburg, 620075 Russia*

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

^c*Federal State Budgetary Institution for Reorganization and Liquidation of Unprofitable Mines and Quarries;
Ogorodny proezd, 5/6, Moscow, 127254 Russia*

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

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

^{###}*E-mail: alexsm94@gmail.com*

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

^{#####}*E-mail: gib74@mail.ru*

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

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

Completion of the development of mineral deposits requires the development of new methods for managing areas disturbed by mining. The closure of mining facilities, especially those with a long history of mining forms a difficult environmental situation. This is determined by several factors. The development of deposits is accompanied by drainage measures changing the balance and structure of surface and groundwater flows, and new chemical agents are involved in the formation of the qualitative composition of the hydrosphere. The use of mined-out space during the development of schemes with roof collapse induces geomechanical processes forming the zones of collapse and displacement accompanied by disturbances of the Earth's surface. The cessation of mine operation means the stop of drainage, which leads to the gradual filling of the depression funnel, the formation of flooding areas and mine water outlets to the surface. Unstable rocks in the quarry sides, on which there were landslides even during drainage, become especially dangerous areas when the water level rises. Taking in consideration that residential and industrial buildings are often historically located in close proximity to mines (sometimes even within the mining allotment), the hydrogeological problems of old industrial areas at the post-operational stage become very acute. At the same time, in many cases it is

difficult to determine, which factors, natural (features of the geological structure, geomorphological conditions, water content of the period) or technogenic (cessation of drainage) are responsible for territory flooding, especially in the areas distant from the objects of completed mining. This gives rise to numerous speculations and leads to irrational technical solutions. By the example of the Chelyabinsk coal basin, the ecological and hydrogeological problems are considered that arise after mining completion and drainage termination. The measures for reducing their negative impact on the hydrogeoeological conditions of the territory are proposed.

Keywords: *hydrogeological conditions, geoeological problems, dewatering, drainage, flooding, water-table uprising, coal deposits, landslide, leaks, water-bearing communications, hollow-hummocky relief*

REFERENCES

1. Barsukov, I.V., Morin, S.V. *Ekologicheskie posledstviya zatopeniya gornyykh vyrabotok na ugol'nykh mestorozhdeniyakh Urala* [Ecological consequences of flooding of mine workings in the coal deposits of the Urals]. *Izvestiya vuzov. Gornyi zhurnal*, 2007, no. 3, pp. 64–71. (in Russian).
2. Borevskii, B.V., Khachiyani, T.P., Yazvin, A.L. *Karta resursnogo potentsiala presnykh podzemnykh vod Rossii. Masshtab 1: 5000000* [Map of the resource potential of fresh underground waters in Russia. Scale 1: 5000000]. Moscow, ZAO "GIDEK", 2012.
3. *Gidrogeologiya SSSR. T. XIV. Ural* [Hydrogeology of the USSR. Vol. XIV. Urals]. V.F. Preis, Ed. Moscow, Nedra Publ., 1972, 648 p. (in Russian).
4. Guman, O.M., Petrova, I.G., Lapin, S.E. *Osobennosti ekologicheskogo monitoringa vblizi ugol'nykh shakht (na primere shakhty "Tsentral'naya" Kopeiskogo raiona Chelyabinskogo ugol'nogo basseina)* [Peculiarities of environmental monitoring near coal mines (by the example of "Tsentral'naya" mine in the Kopeysky district of the Chelyabinsk coal basin)]. *Geologiya i Geofizika*, 2001, no. 13, pp. 223–227. (in Russian)
5. Imaikin, A.K., Imaikin, K.K. *Gidrogeologicheskie usloviya Kizelovskogo ugol'nogo basseina vo vremya i posle okonchaniya ego ekspluatatsii, prognoz ikh izmenenii* [Hydrogeological conditions of the Kizelovsky coal basin during and after the end of its operation, forecast of their changes]. Perm, PGNIU, 2013, 112 p. (in Russian)]
6. Langolf, E.L., Ludzish, V.S., Lazarevich, T.I., Polyakov, A.N. *Aktual'nye problemy osvoeniya ploshchadei gornyykh otvodov posle zatopeniya shakht Kuzbassa* [Actual problems of development of mining allotments after flooding of Kuzbass mines]. *Marksheiderskii vestnik*, 2007, no. 4, pp. 45–48. (in Russian)
7. *Metodicheskie ukazaniya po otsenke gidrogeologicheskikh uslovii likvidatsii ugol'nykh shakht, obosnovaniyu merorpiyatii po upravleniyu rezhimom podzemnykh vod i obespecheniyu ekologicheskoi bezopasnosti* [Guidelines for the assessment of hydrogeological conditions for the liquidation of coal mines, the rationale for measures to manage the groundwater regime and ensure environmental safety]. Moscow, IPKON RAN, 1997, 24 p. (in Russian)]
8. *Metodicheskoe rukovodstvo po proektirovaniyu gorno-ekologicheskogo monitoringa pri likvidatsii shakht ugol'noi otrasli RF* [Guidelines for the design of mining and environmental monitoring during the liquidation of mines in the coal industry of the Russian Federation]. Moscow, Ministry of Energy of the Russian Federation, 2001, 79 p. (in Russian)]
9. Moiseenkov, A.V. *FGBU "GURSH" - dvadtsat' let spustya* [State institution for the reorganization and liquidation of unprofitable mines and open-casts - twenty years later]. *Coal*, 2018, no. 2, pp. 36–39. (in Russian)]
10. Mironenko, V.A., Rumynin, V.G. *Problemy gidrogeologii* [Problems of hydrogeoeology]. Vol. 3 (book 1). Applied research. Moscow, MGGU Publ., 1999, 313 p. (in Russian)
11. Mironenko, V.A., Rumynin, V.G. *Problemy gidrogeologii* [Problems of hydrogeoeology]. Vol. 3 (book 2). Applied research. Moscow, MGGU Publ., 1999, 504 p. (in Russian)
12. Morin, S.V., Barsukov, I.V. *Voprosy otsenki sdvizenii i deformatsii zemnoi poverkhnosti na ranee podrabotannykh territoriyakh ugol'nykh shakht* [Issues of assessing displacements and deformations of the Earth's surface in previously undermined areas of coal mines]. Collection of scientific papers VNIMI. St. Petersburg, 2012, pp. 237–245. (in Russian)
13. Norvatov, Yu.A., Petrova, I.B. *Metodicheskoe rukovodstvo po prognozy gidrogeologicheskikh uslovii likvidatsii ugol'nykh shakht i obosnovaniyu meropriyatii, obespechivayushchikh predotvrashchenie negativnykh ekologicheskikh posledstviy* [Methodological guidance on the forecast of hydrogeological conditions for the liquidation of coal mines and the rationale for measures to prevent negative environmental consequences]. St. Petersburg, VNIMI Publ., 2008, 79 p. (in Russian).
14. *Ob ekologicheskikh posledstviyakh vypolneniya kompleksa merorpiyatii po zaversheniyu restrukturizatsii ugol'noi promyshlennosti Vostochnogo Donbassa na 2006–2010 gody* [On the environmental consequences of the implementation of a set of measures to complete the restructuring of the coal industry in the Eastern Donbass for 2006–2010]. URL: <http://www.donland.ru/Default.aspx?pageid=88038> (date of access: 12/12/2022). (in Russian).
15. *Otraslevaya instruktsiya o poruadke likvidatsii i konservatsii predpriyatii po dobyche uglya (slantsa)* [Instructions on the procedure for the liquidation and conservation of enterprises for the extraction of coal (shale)]. Moscow, Mintopenergo, 1997, 16 p. (in Russian).
16. Rybnikova, L.S., Rybnikov, P.A. *Gidrogeologicheskie issledovaniya v gornom dele na postekspluatatsionnom etape* [Hydrogeological research in mining at the post-operational stage]. *Geoekologiya*, 2018, no. 4, pp. 25–39. (in Russian)

17. Rybnikova, L.S., Rybnikov, P.A. *Zakonomernosti formirovaniya kachestva podzemnykh vod na otrabotannykh mednokolchedannykh rudnikakh Levikhinskogo rudnogo polya (Srednii Ural, Rossiya)* [Regularities in the evolution of groundwater quality at abandoned copper sulfide mines at the Levikha ore field, Central Urals, Russia]. *Geokhimiya*, 2019, vol. 64, no. 3, pp. 282–299. (in Russian)
18. Rybnikov, P.A., Rybnikova, L.S., Maksimovich, N.G., Demenev, A.D. *Issledovanie gidrogeologicheskikh uslovii ugol'nykh mestorozhdenii na posteksploatatsionnom etape s ispol'zovaniem gidrodinamicheskogo modelirovaniya (na primere Kizelovskogo ugol'nogo basseina, Zapadnyi Ural, Rossiya)* [Study of the hydrogeological conditions of coal deposits at the post-operational stage using hydrodynamic modeling (on the example of the Kizel coal basin, Western Urals, Russia)]. *GIAB*, 2020, no. 3.1, pp. 488–500. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-31-0-488-500> (in Russian)
19. *SP 104.13330.2016. Inzhenernaya zashchita territorii ot zatopleniya i podtopleniya* [Set of Rules 104.13330.2016. Engineering protection of the territory from flooding and flooding. Updated version of Building regulations No. 2.06.15–85]. (in Russian)
20. Sokolovskii, A.V., Lapaev, V.N., Temnikova, M.S., Gordeev, A.I. *Tekhnologicheskie osobennosti likvidatsii razreza "Korkinskii"* [Technological features of the liquidation of the Korkinsky open pit mine]. *Ugol'*, 2018, no. 3 (1104), pp. 91–95. (in Russian)
21. *Skhema vodosnabzheniya i vodootvedeniya munitsipal'nogo obrazovaniya "Kopeiskii gorodskoi okrug" Chelyabinskoi oblasti do 2038 goda* [Pattern of water supply and sanitation of the Kopeiski municipal district, Chelyabinsk region, until 2038]. Kopeisk, 2018, 393 p. (in Russian)
22. *Elementy i aspekty posteksploatatsionnogo perioda gornyykh predpriyatii* [Elements and aspects of the post-operational period of mining enterprises] / Tyulenev M.A., Melkhers K., Krechman Yu., Gerke-Malette P., Kleineberg K. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2015, no. 6 (112), pp. 3–13. (in Russian)
23. Anderson, M.P., Woessner, W.W. and Hunt, R.J. *Applied Groundwater Modeling Simulation of Flow and Advective Transport*. Academic Press; Second Edition, 2015, 564 p.
24. *Global Acid Rock Drainage Guide. The International Network for Acid Prevention (INAP)*, 2014, 473 p.
25. Rybnikova, L.S., Rybnikov, P.A. *Pit Lake and Drinking Water Intake: Example of Coexistence (Middle Urals, Russia)*// *Mine Water and the Environment*, 2020. <https://doi.org/10.1007/s10230-020-00691-w.464-472>.
26. Wolkersdorfer, C. *Water management at abandoned flooded underground mines. Fundamentals. Tracer tests. Modelling. Water treatment*. Springer, 2008, 465 p.
27. Younger, P.L., Jenkins, D.A., Rees, B., Robinson J., et al. *Mine waters in Wales: pollution, risk management and remediation. Urban geology in Wales. National Museums and Galleries of Wales Geological Series*, 2004, no. 23, pp. 138–154.

ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ ПРИРОДНЫХ И ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 711+

ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ БЛАГОУСТРОЙСТВА ИСТОРИЧЕСКИХ ГОРОДОВ И ЗАДАЧИ СОХРАННОСТИ ИСТОРИКО-ГРАДОСТРОИТЕЛЬНОГО НАСЛЕДИЯ

© 2023 г. Е. Л. Беляева^{1,*}, П. И. Кашперюк^{2,**}, Б. Г. Могинов³, И. П. Резяпкин^{4,***}

¹ООО “Институт геобиосферных исследований” (ИГБИ),
Анненский проезд, 12, Москва, 127521 Россия

²Национальный исследовательский университет “Московский государственный строительный университет”
(НИУ МГСУ), Ярославское шоссе, 26, Москва, 129337, Россия

³ФГУП “Центральные научно-реставрационные проектные мастерские” Минкультуры России,
ул. Школьная, 24, Москва, 109544 Россия

⁴ООО “Геокаркас”, ул. Елецкая, 22/25, Москва, 115583 Россия

*E-mail: igbi@yandex.ru

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

***E-mail: from.work055@gmail.com

Поступила в редакцию 18.10.2022 г.

После доработки 13.01.2023 г.

Принята к публикации 30.01.2023 г.

В статье приведены обзор литературных источников, анализ примеров и фактических данных, подтверждающих влияние факторов благоустройства на состояние объектов культурного наследия. Из них наиболее значимы по воздействию на геологическую среду и соответственно на сохранность памятников архитектуры мероприятия по вертикальной планировке и водоотведению. В условиях высокоплотной застройки неудовлетворительное благоустройство может стимулировать процессы подтопления территорий, суффозии и карста, а также техногенного изменения свойств грунтов, утрату несущей способности оснований и фундаментов. У памятников архитектуры и исторических зданий могут наблюдаться подтопление подвалов, “замокание” стен, образование трещин на фасадах. Исследование обобщает наблюдения и результаты, полученные авторами – представителями различных специальностей (инженеры, геолог, архитектор-реставратор) на различных этапах их творческой деятельности, и учитывает многолетний опыт ООО “ИГБИ” по проектированию благоустройства на исторических территориях Москвы. Рассмотрены и предложены для практического применения на исторических территориях некоторые инженерные решения, приемы и материалы, позволяющие улучшить геоэкологическую обстановку и обеспечить инженерную защиту памятников архитектуры.

Ключевые слова: техногенез геологической среды, исторические территории, сохранность культурного наследия, благоустройство, водоотведение, подтопление, разрушение памятников архитектуры, геоэкологические изыскания и мероприятия

DOI: 10.31857/S0869780923020029, EDN: TVVSBW

ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на то что практически повсеместно на территориях исторических городов под влиянием недостатков благоустройства наблюдается прогрессирующий техногенез геологической среды и подземных вод, что может вести к разрушению памятников архитектуры и исторически ценной застройки, данная проблематика остается малоизученной. Учитывая огромный масштаб работ по благоустройству исторических территорий, который планируется выполнить по национальным проектам и муниципальным программам, исследования

этого направления для совершенствования методики проектирования и инженерных изысканий, как объективной основы выработки проектных решений, весьма актуальны. Для исторических территорий городов, включающих памятники архитектуры и ценную застройку, необходимы специализированные методики проектирования и инженерно-экологических изысканий, геоэкологического мониторинга, включающие мероприятия по обеспечению сохранности объектов культурного наследия.

Выполненное междисциплинарное исследование является примером того, что для решения

актуальной практической задачи учета геоэкологических требований для обеспечения тем самым сохранности культурного наследия, объединили свои усилия специалисты нескольких направлений и дисциплин – в области градостроительства, геологии и геоэкологии, архитектуры и реставрации культурного наследия, инженерного проектирования и геотехники. Это стало возможным благодаря убежденности авторов настоящей статьи в необходимости принятия срочных мер для обеспечения сохранности памятников архитектуры и исторически ценной застройки на территориях городов. Исследование выполнено на примере объектов, расположенных в Москве. При этом главной парадигмой исследования всеми авторами признано то, что обеспечение сохранности культурного наследия – актуальная геоэкологическая проблема на исторических территориях городов и поселений, которая недостаточно учитывается при их благоустройстве.

Авторы подтверждают формирование в почвогрунтах в пределах исторической застройки специфичной по свойствам геологической среды из-за просчетов благоустройства и недостатков водоотведения, ускорение процессов разрушения оснований и фундаментов, подтопления зданий, “замокания” стен, разрушения и утраты декоративных качеств ценных фасадов. В статье приводятся материалы фотофиксации, выполнявшейся при маршрутных натурных исследованиях в 2022 г. на объектах культурного наследия Москвы, где под влиянием “благоустройства” сложились вышперечисленные проблемные ситуации.

При проектировании благоустройства на исторических территориях предлагается проводить специальные инженерные изыскания и при этом учитывать геологические, гидрогеологические, геоэкологические особенности объектов благоустройства и зоны возможного влияния работ. Рекомендовано включение перечисленных факторов в состав и содержание инженерных изысканий в качестве обязательных для обоснования проектов благоустройства на исторических территориях. Проведение натурных исследований и изысканий должно дополнить недостаточно востребованное информационное обеспечение, разработанное для градостроительного проектирования в Москве. И именно в таком сочетании информационное обеспечение проектирования благоустройства станет достаточным для разработки мероприятий по обеспечению сохранности культурного наследия.

В статье рассмотрены и предложены для практического применения на исторических территориях некоторые инженерные решения, приемы и материалы, позволяющие улучшить геоэкологическую обстановку, обеспечить инженерную защиту памятников архитектуры. Рекомендовано

применение геосинтетических материалов, расчетами обоснованы конструкции дорожных одежд с их использованием.

АКТУАЛЬНОСТЬ ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ПРОБЛЕМАТИКИ ДЛЯ БЛАГОУСТРОЙСТВА ИСТОРИЧЕСКИХ ГОРОДОВ

По опыту инженерных изысканий и разработки проектной документации на благоустройство исторических территорий в Москве [1–3], исходя из состава и содержания нормативных документов по комплексному благоустройству в Москве, можно утверждать, что требованиям, связанным с сохранностью культурного наследия, не уделяется достаточного внимания; специальные инженерно-геологические и гидрогеологические изыскания для проектирования благоустройства, как правило, не проводятся, а инженерно-экологические выполняются исключительно в объеме определения химического, биологического и радиационного загрязнения почв (при необходимости водных объектов) для обоснования мероприятий по озеленению и охране окружающей среды.

Между тем, по практике и оценке результатов работ проектировщикам благоустройства, выполняющим работы на исторических территориях, и реставраторам, специализирующихся на проектировании объектов культурного наследия (ОКН), хорошо известно, что непродуманное благоустройство часто является фактором, “запускающим” процессы их разрушения.

Особенно негативно на памятники архитектуры в условиях плотной застройки и при минимальной площади незамощенных поверхностей могут влиять приемы и способы водоотведения. Поверхностный сток с кровель исторических зданий, как правило, сбрасывается “на рельеф”. Из-за недостатков вертикальной планировки, ливневой канализации и дренажа поверхностный сток через трещины в покрытиях и разрушения водоотводящих систем попадает в грунты и подземные воды. При отсутствии в окружении зданий газонов или других фильтрующих поверхностей затрудняется испарение, а территории систематически подтапливаются. Особенно часто при недостатках водоотведения подтопление исторических зданий и ОКН формируется внутри Бульварного кольца и в Замоскворечье на территориях заасфальтированных дворов.

В исторической застройке многих городов, даже в центре Москвы, внутриквартальная ливневая канализация может отсутствовать. Нужно учитывать, что отведение поверхностного стока с жилых территорий (включая исторические) по нормативам не является обязательным. Крупные административные и общественные здания, как правило, имеют закрытый водосброс с кровель с

отведением в ливневую канализацию. Закрытый водосброс в ливневую канализацию предусмотрен с крупных приобъектных автостоянок, где проводится очистка сбросного стока.

Существует ряд общепризнанных исследований: прежде всего это крупные работы геолога-реставратора Е.М. Пашкина [12, 13], а также работы инженеров-градостроителей: Н.П. Шепелева [15], диссертация В.Д. Оленькова [10], выполненная на примере Ростова-на-Дону, диссертация П.А. Шумеева, [16], описывающих процессы разрушения памятников архитектуры в результате техногенеза геологической среды и подземных вод. Значимое влияние современных изменений окружающей среды на памятники архитектуры и историческую застройку, в том числе геоэкологических и гидрогеоэкологических факторов, исследуется в работах В.П. Князевой [8], М.С. Орлова и К.Е. Питьевой [11].

В работах [6, 7] указывается, что неудовлетворительное благоустройство и особенно отведение поверхностного стока, водопонижение, утечки из водонесущих коммуникаций имеют следствием подтопление территории и развитие карстово-суффозионных процессов. Состояние водоотведения, утечки, воздействие теплотрасс могут быть выделены как важнейшие факторы техногенеза геологической среды, изменения режима подземных вод, развития подтопления на исторических территориях и как наиболее значимые факторы, влияющие на состояние объектов и территорий и жизненный цикл зданий и сооружений, особенно относящихся к культурному наследию.

В известной работе по геологии Москвы – коллективной монографии, вышедшей к 850-летию Москвы под ред. В.И. Осипова и О.П. Медведева, приводится анализ факторов, отдельные материалы фотофиксации, подтверждающие влияние недостатков благоустройства и состояния инженерных сетей на техногенез геологической среды, на развитие подтопления и формирование целого ряда других опасных инженерно-геологических процессов. По сведениям, представленным в этой монографии, исторический центр Москвы (в границах Камер-Коллежского Вала), в основном относится к категориям “потенциально подтопляемых” и “неподтопленных” территорий. Тем не менее, очевидно, что локальные проблемные ситуации в отдельных зонах могут быть весьма критическими (о чем свидетельствует наш опыт проектирования и инженерных изысканий на объектах, расположенных на Софийской набережной и Балчуге в середине 1990-х гг., на Берсеневской и Садовнической набережных в 2000-х гг.). Приведенные примеры подтопления, как известно, связаны с фильтрацией из р. Москва и Водоотводного канала. Локальные ситуации с подтоплением наблюдаются



Рис. 1. Разрушение здания, вызванное провалом, образовавшимся в результате выноса водонасыщенных несвязных пород в подземную горную выработку (Москва, 1998). Фото В.П. Хоменко [14].

в районе улиц Арбат, Пречистенка, Воздвиженка, на Чистых прудах, но они развиваются также под влиянием недостатков благоустройства и преобладающей асфальтировки со второй половины XX в.

Другим наиболее распространенным геологическим процессом, связанным с водоотведением (водопонижением) на благоустраиваемых исторических территориях, является суффозия. Развитие этого процесса, согласно исследованиям В.П. Хоменко [14], может проявляться в виде открытой суффозии, когда минеральное вещество выносятся из толщи горных пород на поверхность, так и закрытой, когда переносимые частицы грунта накапливаются в другой части толщи горных пород. Протекание такого процесса может выражаться в виде понижений на земной поверхности, а в отдельных случаях, как это показано на рис. 1, может приводить к провальным явлениям.

Известно, что в Москве определяющая часть развивающихся неблагоприятных инженерно-геологических процессов, так или иначе, связана с проблематикой изменения гидрогеологического режима территорий и подтоплением. Согласно данным, приведенным в монографии [9], на территории ЦАО – 22 га подтопленных территорий, в Западном более чем в 2 раза, а в Восточном в 3 раза больше. Однако следует учитывать, что плотность и ценность исторической застройки, количество памятников архитектуры здесь несопоставимо выше, а потому решение проблемы подтопления в центре при комплексном благоустройстве является архиважным.

Ранее упоминавшийся опыт изысканий и проектирования реставрации и реконструкции памятников архитектуры, расположенных вдоль правого берега р. Москва на Берсеневской набе-

режной у известного “Дома на набережной”, опыт ранее выполненных градо-экологических обоснований объектов реконструкции на Софийской набережной, опыт инженерно-геологических и экологических обоснований реставрации и реконструкции исторических зданий на Балчуге, и многолетний опыт проектирования и инженерных изысканий для территорий ОКН, показывают, что специальные инженерно-геологические и гидрогеологические изыскания для благоустройства прилегающих территорий не проводятся. Примером может быть проект реставрации и реконструкции Большого театра, где инженерные изыскания первоначально проводились исключительно в “пятне” застройки, с чем мы как эксперты ГЭЭ категорически не согласились, и впоследствии по замечаниям были выполнены дополнительные изыскания и разделы ОВОС, в том числе на благоустройство и перекладку сетей.

Считаем, что для объектного проектирования и специализированных проектов благоустройства в исторической части городов (в том числе Москвы) необходима специальная методика проектирования, учитывающая инженерно-геологические, гидрогеологические, геоэкологические особенности исторических территорий, а также геотехнических особенностей грунтов, прилегающих к памятникам архитектуры, историческим зданиям и сооружениям [6, 7]. Могут и должны учитываться особенности формирования геологической среды различных периодов и различного генезиса, определившие современные свойства грунтов, обусловленные взаимодействием факторов в системе “здание – геологическая среда”.

При разработке специализированной (для исторических территорий) методики проектирования благоустройства [2, 3] предлагается максимально учитывать многофакторную совокупность инженерно-геологических, гидрогеологических, геоэкологических, геотехнических факторов и условий в целях комплексного обоснования мероприятий по обеспечению сохранности культурного наследия в составе таких проектов. При проектировании благоустройства должны применяться научно обоснованные решения вертикальной планировки, покрытий, организации открытых и закрытых водоотводящих систем, различные инженерные решения дренажа и специальные геотехнические мероприятия, эффективные в системе “здание – геологическая среда”, что позволит добиться регенерации территорий и инженерной защиты памятников [15, 16].

АНАЛИЗ ПРАКТИКИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И РЕЗУЛЬТАТОВ БЛАГОУСТРОЙСТВА ИСТОРИЧЕСКИХ ТЕРРИТОРИЙ НА ПРИМЕРЕ МОСКВЫ

Здесь и далее анализ практики выполнялся с позиций учета инженерно-геологических, гидрогеологических, геоэкологических, геотехнических факторов особенностей исторических территорий. Анализу предшествовали многочисленные натурные (маршрутные) исследования в 2022 г. состояния и технических решений внутриквартальных территорий на ул. Б. Дмитровка, в Столешниковом переулке, на улицах Пятницкая, Садово-Кудринская (территория Филатовской больницы), Школьная, на проспекте Мира. Отдельные материалы фотофиксации приводятся в данной статье.

Обобщение маршрутных натурных исследований позволяет утверждать, что вышеперечисленные факторы не учитывались при принятии решений по благоустройству территорий не только рядовых объектов, но даже для территорий, имеющих статус ОКН (территория Филатовской больницы – ОКН регионального значения). Практически они никогда не рассматриваются как принципиально-значимые факторы для принятия решений по вертикальной планировке, устройству водостоков, дренажа, при выборе видов и конструкций покрытий внутриквартальных территорий, при решении вопросов озеленения и подборе породного состава насаждений. Между тем, нужно учитывать, что при правильном, научно обоснованном благоустройстве можно замедлить процессы техногенеза геологической среды, предотвратить или замедлить деградацию памятников и градостроительного наследия.

Ниже приведем некоторые примеры из практики недавней реставрации памятников архитектуры (до 5 лет), где неудовлетворительное благоустройство прилегающих территорий до сих пор стимулирует разрушения конструкций и ухудшает внешний вид зданий.

ОКН – Палаты XVII в. на ул. Пятницкая, д. 17 (примыкают к комплексу зданий “Мосгорнаследия”) – одно из старейших зданий в Замоскворечье. При реставрации для восстановления исторических отметок части главного фасада, выходящего на озелененную территорию, в полосе до 1 м было проведено снятие культурного слоя на глубину до 0.8 м с формированием узкой террасы, ограниченной подпорной стенкой. При неудовлетворительном решении водостока и дренажа с кровли здания и прилегающей территории к выемке, такое решение спровоцировало замокание стены, развитие трещин на фасаде, подтопление подвалов (рис. 2).

ОКН в составе комплекса зданий “Мосгорнаследия” (ул. Пятницкая, влад. 19 и 18). Оба владе-

ния застраивались в конце XVIII – начале XIX вв. (архитектор О. Бове). Фотоснимок влад. 18, представленный на рис. 3, показывает быстрое проявление “результатов современного благоустройства” прилегающих территорий на недавно отреставрированном главном фасаде здания, дворовых фасадах и оштукатуренном ограждении двора. Обследования зафиксировали недостатки вертикальной планировки, полное отсутствие фильтрующих поверхностей во дворе, недостаточную проработанность и некачественную работу водостока. Результатом являются “замокание” конструкций цоколей и разрушения отделки фасадов.

На состояние главного фасада влад. 18 и оштукатуренного ограждения двора, а также цоколей и фасадов строений, расположенных во влад. 19, значительно повлияла “реконструкция” тротуаров Пятницкой улицы и площади у входа станции метро Новокузнецкая, которая в настоящее время полностью замощена за счет исключения озелененных участков и установки деревьев в контейнерах. При натурных обследованиях на ул. Пятницкая установлены и недостаточность уклонов, и неудовлетворительное состояние водосточных систем.

ОКН – “Дом Протковой” (начало XIX в., архитектор О. Бове), расположен на Садово-Кудринской улице, д. 15 (территория детской Филатовской больницы). Мощение тротуара в 2016 г., выполненное при реконструкции Садового кольца без необходимых уклонов и на сухую смесь (недопустимый способ по Е.М. Пашкину [12]), привело к “замоканию” стен главного фасада, ускоренному разрушению цоколя и многочисленным трещинам на фасаде и портике здания. Аналогичные дефекты видны также на кирпичном оштукатуренном ограждении и воротах, прилегающих к зданию (рис. 4).

Однако наибольшую опасность для Дома Протковой представляет современное благоустройство внутреннего двора с частичным восстановлением отметок дворовых фасадов за счет снятия культурного слоя, формирования неширокой (около 1 м) низкой террасы с подпорной стенкой и мощением из плитки. Это решение существовало еще на момент обследования территории в 2016 г. в связи с планировавшимся благоустройством территории больницы. Уже тогда были значительно подтоплены подвалы, замочали стены, во внутренних помещениях одноэтажного здания с деревянными перекрытиями была повышенная влажность, и ощущался запах гнили.

Необходимость исследовать гидрогеологическую обстановку, оптимизировать решения по водоотведению и выполнить дренаж была очевидна и известна администрации больницы. В дальнейшем наши рекомендации по устройству дренажа не были учтены, и в ныне реализованном



Рис. 2. Организация рельефа при реставрации Палат XVII в. и восстановлении исторических отметок главного фасада. Отмечаются нарушение водостоков, замокание стен, образование трещин на фасаде.



Рис. 3. Фотофиксация проблемных ситуаций, связанных с благоустройством прилегающих территорий отреставрированной Городской усадьбы конца XVIII – начала XIX вв. Водостоки, трещины на фасадах (ОКН, Пятницкая, 18).



Рис. 4. Фотофиксация разрушений и трещин на главном фасаде “Дома Протковой” (начало XIX в.) и оштукатуренного исторического ограждения Филатовской больницы (Садово-Кудринская ул., 15).

проекте благоустройства ситуация с водоотведением не улучшилась, а напротив, ухудшилась (рис. 5). Как показало обследование, состояние цоколя и дворовых фасадов ухудшилось (осмотреть внутренние помещения не представилось возможности).



Рис. 5. Фотофиксация дворовых фасадов и территорий, прилегающих к “Дому Протковой” (ОКН – Садово-Кудринская, 15). Водостоки. Трещины на фасадах.

Со слов настоятеля храма Великомучениц Софии и Татианы (ОКН, архитектор А. Каминский, конец XIV в.), расположенного на территории Филатовской больницы, подтопление проявилось практически сразу после ввода объекта в эксплуатацию в 2012 г., и тогда уже специалисты эту проблему связывали с недостатками водоотведения и укладкой плитки на всей прилегающей территории. Это отразилось в “замокании” стен, переувлажнении внутренних помещений, в многочисленных трещинах на фасадах. Обследование в 2022 г. после недавнего благоустройства территории с заменой плитки вокруг храма показало, что условия водостока принципиально не улучшились. Необходимый дренаж не выполнен, озеленение или другие фильтрующие поверхности не появились, и негативные процессы подтопления продолжают, оказывая нежелательное влияние на сохранность ОКН.

Нужно учитывать, что даже в Москве пока сохранилось большое количество исторических зданий, не имеющих статуса ОКН. Среди них много деревянных или деревянных оштукатуренных, причем в настоящее время в силу разных обстоятельств (в том числе увеличения толщины культурного слоя и благоустройства) они уже не имеют вентилируемых подполий. Для сохранности таких зданий крайне важно создание благоприятного гидрогеологического режима, что может решаться за счет озеленения прилегающей территории при ее благоустройстве.

Между тем, существуют положительные примеры, когда в сложных случаях подтопления памятников архитектуры и прилегающих территорий (например, в условиях фильтрации вод р. Москва на Берсеневской набережной) применялся дренаж. В таких случаях по дренажным трубам вода отводится в городскую ливневую канализацию. В основном при благоустройстве прокладка дренажных систем не требуется, но необходимо соблюдать нормативные уклоны поверхностей водосбора, применять фильтрующие покрытия, устраивать надежную систему закрытых и открытых водосточных лотков и сохранять незамощенные (озелененные) поверхности, обеспечивающие интенсивное поглощение и испарение влаги.

К сожалению, на практике это бывает “трудно достижимо”. Весной 2022 г. было детально обследовано здание ОКН (вторая половина XIV в.) на пр. Мира около выхода радиальной ветки метро. Проведенное обследование главного и дворовых фасадов недавно отреставрированного здания выявило многочисленные дефекты отделки и конструкций (входов, лестниц, террас), сформировавшиеся в результате неудовлетворительной организации водосброса на рельеф и последующего водоотведения. На пр. Мира и на прилегаю-

шей площади близко расположены водопримемные колодцы, технические возможности для правильной организации водостока безусловно имеются, но практика оставляет желать лучшего.

Тем не менее все же есть отдельные положительные примеры решений благоустройства территорий, прилегающих к ОКН, и приведем их ниже.

При благоустройстве территории здания ОКН на ул. М. Никитская, д. 29 (напротив Храма Вознесения) при восстановлении исторических отметок фасада низкая терраса вдоль него была запроектирована довольно широкой, чем были обеспечены благоприятные условия водостока за счет уклонов. Для ускорения водоотведения использовался закрытый дренаж, прилегающая озелененная территория создавала хорошие условия для испарения влаги.

Безусловно, положительным примером проведенной реставрации некогда проблемного ОКН, ранее разрушавшегося под влиянием техногенных факторов (и прежде всего подтопления), может быть известный дом архитектора К. Мельникова в Кривоарбатском переулке (начало XX в.). При его реставрации была благоустроена прилегающая территория, причем практически не применялись твердые покрытия. Использовались в основном фильтрующие (гравий, гранитные высевки); сделали много газонов и цветников, которые буквально примыкают к зданию. Доля газонов и цветников в балансе территории — более половины площади участка. На территории установили скважину с оборудованием для гидрогеологического мониторинга на период эксплуатации, это означает, что на этапе изысканий проводились детальные исследования, и составлялись прогнозы изменения уровня подземных вод при планируемой реставрации и благоустройстве (рис. 6).

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО СОЗДАНИЮ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОЙ МЕТОДИКИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ БЛАГОУСТРОЙСТВА, ОБЕСПЕЧИВАЮЩЕЙ СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЙ С УЧЕТОМ ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИХ ТРЕБОВАНИЙ

В работах Е.Л. Беляевой [1–3] предлагается разработка специализированной методики благоустройства для исторических городов, которая должна учитывать большое количество информации по территориям объектов проектирования и прилегающей застройке исторических кварталов, среди которых памятники архитектуры и ценные объекты градостроительной среды. Предложенные модели предпроектных исследований и проектирования в будущем могут стать основой раз-



Рис. 6. Дом архитектора К. Мельникова. Современное благоустройство территории (Кривоарбатский пер., 10).

работки такой методики в виде информационно-аналитических моделей для соответствующей отраслевой системы ГИС (см. рис. 10, 11 в работах [2, 3]).

По направлению инженерно-геологических, гидрогеологических, геоэкологических факторов и условий (в некоторых случаях возможно геотехнических) информационную базу, по-видимому, должны составлять не только мелкомасштабные, но и крупномасштабные, и даже детальные карты (например, в Москве — электронные карты М 1 : 10 000 Москомархитектуры), фондовые материалы, но также результаты специальных инженерных изысканий, выполняемых в соответствии с требованиями соответствующих нормативных документов. На этой научной и технической основе в проектах благоустройства исторических территорий должны разрабатываться специальные мероприятия по обеспечению сохранности культурного наследия.

С нашей точки зрения весьма перспективными для применения при благоустройстве исторических территорий могут быть новые инженерные решения дорожных одежд, выполненные с использованием геосинтетических материалов. Рассмотрим некоторые примеры применения геосинтетических материалов, которые могут быть использованы при реконструкции и устройстве дорожных одежд в исторических кварталах, повышающие прочность и долговечность дорожных одежд и обладающие гидроизолирующими свойствами, а также расчеты, обосновывающие их применение, выполненные инженером И.П. Резяпкиным.

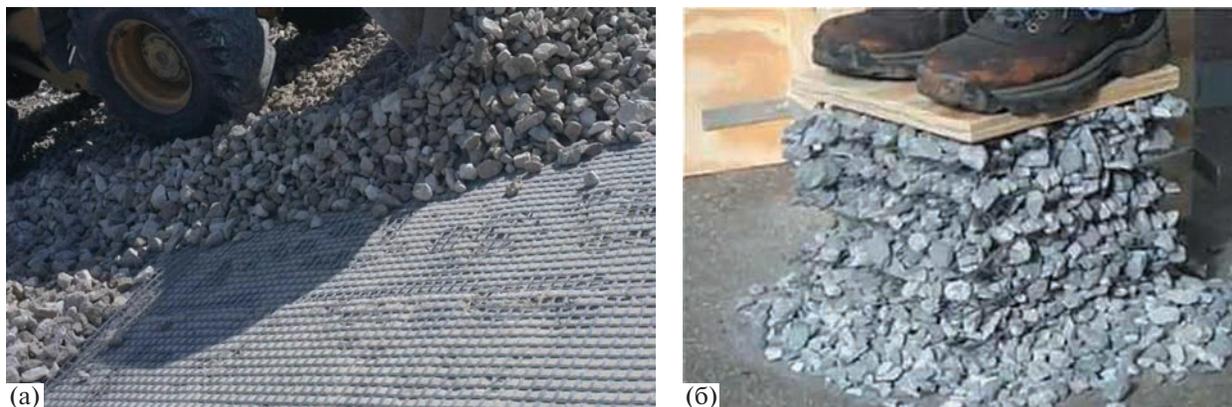


Рис. 7. Общий вид георешетки в конструкции (а) и эффект армирования дисперсных несвязных грунтов георешетками (б).

РЕКОМЕНДАЦИИ И ОБОСНОВАНИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ БЛАГОУСТРОЙСТВА ИСТОРИЧЕСКИХ ТЕРРИТОРИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ГЕОСИНТЕТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Рекомендации направлены на принятие оптимальных конструктивных решений при реконструкции внутриквартальных проездов, парковок, пешеходных дорог и эксплуатируемых газонов с использованием геосинтетических материалов различного назначения в непосредственной близости памятников архитектуры. Геосинтетические материалы (ГМ) — класс строительных материалов, предназначенный для создания прослойки, повышающей надежность, и/или предающий специализированные свойства конструкции. Основная цель геоматериалов заключается в обеспечении функционирования конструкции или ее отдельных элементов в сложных условиях эксплуатации. Устройство прослоек из ГМ повышает надежность и продолжительность службы конструкции, позволяет упростить технологию производства работ, потенциально сократить сроки строительства, уменьшить расход традиционных материалов (таких, как песок, щебень).

Можно выделить 4 основные функции геоматериалов, применяемых в конструкции покрытий (дорожных одежд):

- армирование — усиление конструкций оснований за счет перераспределения напряжений, возникающих в грунтовом массиве при действии нагрузок от транспортных средств и собственного веса;

- защитно-разделительная — предотвращение или замедление взаимопроникновения и перемешивания различных конструктивных слоев между собой (грунт-песок; песок-щебень);

- дренаживание — ускорение отвода воды;

- гидроизоляция — отсечение поступающей воды в конструкцию (атмосферные осадки или грунтовые воды).

Рассмотрим применение армирующих прослоек в виде георешеток (рис. 7), скриншоты из видеоролика с сайта <http://retainingwallexpert.com>).

Данный вид геоматериала работает, как армирующий элемент в пределах грунтовой толщи или в комбинации с зернистым материалом, благодаря чему создается композитная структура с улучшенными характеристиками прочности и деформативности по сравнению с исходным неармированным грунтовым или монолитным массивом. При армировании георешетки воспринимают на себя напряжения растяжения, а грунт — напряжения сжатия.

Согласно ОДМ 218.5.002-2008 “Методические рекомендации по применению полимерных геосеток (георешеток) для усиления слоев дорожной одежды из зернистых материалов”¹, введение в конструкцию дорожной одежды георешетки позволяет усилить дорожную одежду и предупредить взаимопроникновение материалов контактирующих слоев. Усиление достигается благодаря совместной работе георешетки с зернистым материалом основания (покрытия переходного типа), приводящей к блокировке (ограничению перемещений) отдельных зерен этого материала в ячейках (георешетки). Образованный композитный слой “зернистый материал + георешетка” обладает лучшими механическими свойствами, прежде всего, повышенной устойчивостью к воздействию динамических нагрузок.

При расположении арматуры в направлении главных растягивающих напряжений и соблюдении указанного условия деформации растяжения существенно ограничены по величине в зависимости от относительной растяжимости арматуры.

¹ URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293832/4293832048.pdf>

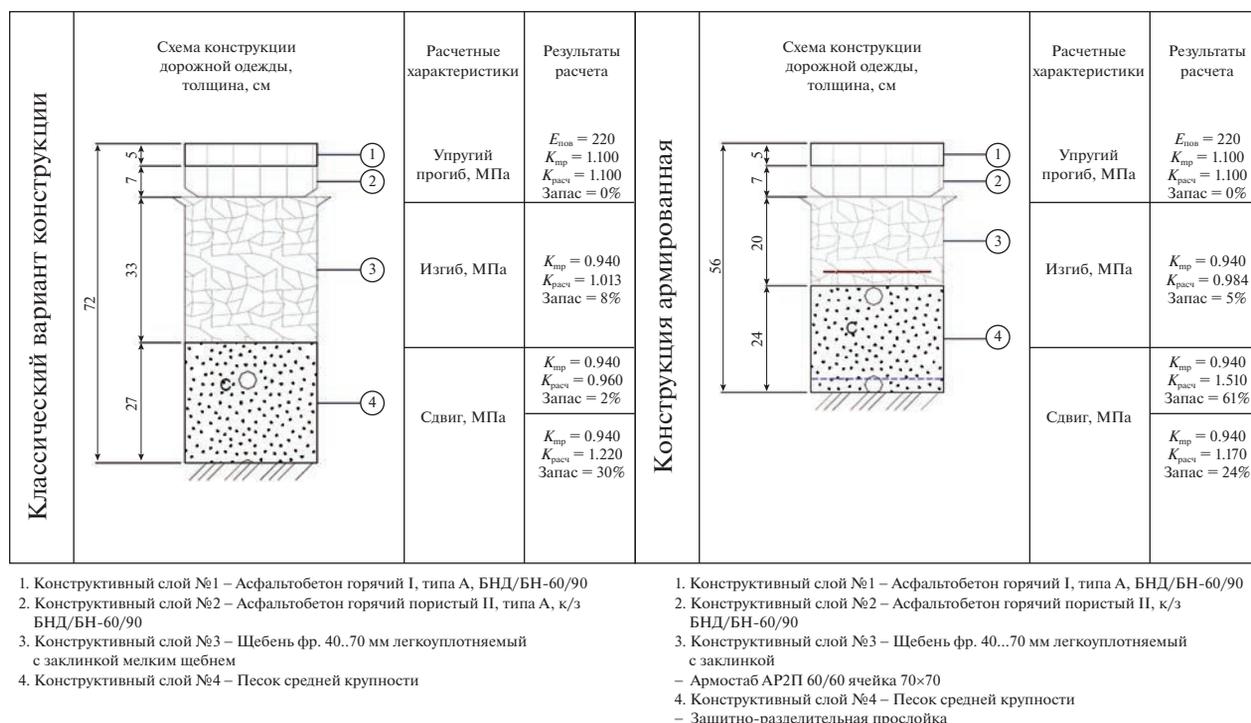


Рис. 8. Сравнение конструкций с армирующей прослойкой из ГМ и без нее.

Такую особенность можно проиллюстрировать изображением, представленным на рис. 7б. Наглядно видно, что куб армированного щебня представляет собой подобие связного грунта, способного выдерживать прикладываемые к нему нагрузки, сохраняя вертикальность граней. Таким образом, послойно помещенные в грунт горизонтальные армирующие элементы будут препятствовать боковой деформации благодаря возникновению сил трения между ними и грунтом, что соответствует состоянию вестороннего сжатия. Разрушение может произойти только в случае превышения прочности щебня или армоземента.

Установлено, что для обеспечения корректной работы георешетки совместно с грунтом-заполнителем необходимо подбирать размер ячеек при армировании оснований дорожной одежды и земляного полотна. При этом должно соблюдаться условие:

$$0.5(d + D) < 0.8A,$$

где d и D – наименьший и наибольший номинальный размер зерен каменного материала в основаниях и дополнительных слоях дорожной одежды соответственно; A – средний размер ячейки.

Условие выполняется для щебня фракции 40 × 70 мм при размере ячейки 70 × 70 мм; для песчано-щебеночной смеси С4 при размере ячейки 60 × 60 мм.

Таким образом, эффективность использования георешеток заключается в двойном эффекте их работы: повышении сопротивления сдвигу (эффект блокировки) и снижении давления на подстилающий грунт (мембранный эффект). Благодаря вышеописанным свойствам георешеток в конструкции допускается снижение толщины нерудных материалов (щебня, щебеночно-песчаной смеси), что приводит к снижению общей толщины конструкции.

При этом сокращение толщины конструкции не приводит к снижению прочностных характеристик. На рис. 8 представлено сравнение двух вариантов конструкций дорожной одежды для внутриквартальных проездов. В качестве грунта основания использовался суглинок легкий с расчетной относительной влажностью 0.74. По количеству пылевато-глинистых частиц грунт отнесен ко второй группе по пучинистости. Расчетные параметры нагрузки, коэффициента надежности и частота приложения нагрузки назначены в соответствии с рекомендациями ОДМ 218.046-01 “Проектирование нежестких дорожных одежд”².

В свою очередь уменьшение мощности конструкции (в данном примере конструкции дорожной одежды) приводит к сокращению времени работы техники по демонтажу старой конструкции, уменьшению количества техники по

² URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293823/4293823999.pdf>

доставке строительных материалов, а также сокращает время работы машин, вовлеченных в строительство конструкции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В условиях нарастающего влияния техногенеза на геологическую среду и подземные воды ускоряются деградация и разрушение культурного наследия, при этом часть негативных процессов является следствием неудовлетворительного благоустройства и водоотведения.

Анализ многочисленных реализованных объектов благоустройства в Москве свидетельствует, с одной стороны, о влиянии благоустройства на геологическую среду и подземные воды, с другой — об отсутствии должного внимания к геологическим проблемам при проектировании, что на практике негативно влияет на результаты благоустройства в отношении сохранности памятников архитектуры и исторической застройки.

Анализ практики и теоретические исследования содержат факты, подтверждающие, что негативное влияние зачастую связано с неудовлетворительными решениями вертикальной планировки и отведения поверхностного стока, увеличением доли замощенных поверхностей и отсутствием должного учета геологических, гидрогеологических, геоэкологических, геотехнических условий территории благоустройства.

Доказана необходимость (обязательность) проведения инженерно-геологических и инженерно-экологических изысканий для обоснования проектов благоустройства, а также разработки и утверждения специализированных нормативных документов по инженерным изысканиям для проектирования благоустройства исторических территорий городов, состав и содержание работ, которые смогут обеспечить геоэкологическую устойчивость территории и сохранность культурного наследия.

Исследование показало, что для проектирования благоустройства исторических территорий актуальной задачей являются проведение междисциплинарных исследований и ведение межотраслевой практической деятельности, а для этого необходимо формирование соответствующих методологии и методики инженерных изысканий и проектирования.

Подтверждено, что при создании специализированной методики проектирования благоустройства для исторических территорий городов необходимо включение в ее состав информационно-аналитических инструментов для учета инженерно-геологических, гидрогеологических и инженерно-экологических факторов.

Для благоустройства исторических территорий рекомендованы перспективные конструк-

тивные схемы и технические решения дорожных одежд с применением геосинтетических материалов, что будет способствовать эффективному решению геоэкологических проблем и повышению сохранности культурного наследия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Беляева Е.Л.* Особенности благоустройства и озеленения исторических городов. Подходы и методические рекомендации. М: Экон-Информ, 2021. 270 с.
2. *Беляева Е.Л.* Методология и методика проектирования благоустройства и озеленения исторических городов. Ч. 1. Научное содержание информационно-аналитической модели проектирования благоустройства и озеленения исторических городов // *Academia*. Архитектура и строительство, 2022. № 2. С. 59–68.
3. *Беляева Е.Л.* Методология и методика проектирования благоустройства и озеленения исторических городов. Ч. 2. Использование картографических методов и разработка информационно-аналитических моделей // *Academia*. Архитектура и строительство. 2022. № 3. С. 77–87.
4. *Гладков В.Ю.* Армирование зернистых оснований нежестких дорожных одежд геотекстильными прослойками в виде сеток: автореф. на соиск. уч. степ. канд. тех. наук. М.: Союздорнии, 1985.
5. *Казарновский В.Д.* Синтетические нетканые материалы в транспортном строительстве М.: Транспорт, 1984.
6. *Кашиперюк П.И., Юлин А.Н.* Качество инженерных изысканий как фактор формирования устойчивых природно-техногенных систем // *Вестник МГСУ*. 2014. № 1. С. 83–89.
7. *Кашиперюк П.И., Никитина К.В.* К вопросу о карстово-суффозионных проявлениях в карстующихся толщах города Москвы // *Опасные для строительства геологические процессы*. Сб. матер. Междунар. сем., посв. 70-летию д.г.-м.н., профессора В.П. Хоменко. 2019. С. 40–42.
8. *Князева В.П.* Экология. Основы реставрации. Учеб. пос. М.: “Архитектура-С”, 2005. 400 с.
9. Москва. Геология и город / Под ред. В.И. Осипова, О.И. Медведева М.: Московские учебники и картография, 1997. 350 с.
10. *Оленьков В.Д.* Методологические основы восстановления и использования нарушенных территорий для градостроительства с учетом аэрационного режима на примере Челябинской области: дис. докт. тех. наук. М.: МГСУ, 2018. URL: https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_008715430.
11. *Орлов М.С., Питьева К.Е.* Гидрогеоэкология городов. М.: ИНФРА-М, 2013. 397 с.
12. *Пашкин Е.М.* Инженерная геология (для реставраторов). Уч. пос. М.: Архитектура-С, 2005. 264 с.
13. *Пашкин Е.М.* Инженерно-геологическая диагностика деформаций памятников архитектуры. М.: Традиция, 2022. 352 с.

14. Хоменко В.П. Закономерности и прогноз суффозионных процессов. М.: ГЕОС, 2003. 216 с.
15. Шепелев Н.П., Шумилов М.С. Реконструкция городской застройки. М.: Высшая школа, 2000. 270 с.
16. Шумеев П.А. Градоэкологическое обеспечение сохранения исторической застройки на основе мониторинга среды: на примере г. Ростова-на-Дону: автореф. дис. ... канд. тех. наук. М., 2014. 20 с.

GEOECOLOGICAL PROBLEMS UPON IMPROVEMENT OF HISTORIC CITIES AND PRESERVATION OF HISTORIC URBAN HERITAGE

E. L. Belyaeva^{a,#}, P. I. Kashperyuk^{b,##}, B. G. Moginov^c, and I. P. Rezyapkin^{d,###}

^a*Institute for Geobiosphere Research, Annenskii pr., 12, Moscow, 127521 Russia*

^b*National Research University – Moscow State Civil Engineering University, Yaroslavskoe sh., 26, Moscow, 129337 Russia*

^c*Central Scientific Restoration and Design Works, Ministry of Culture of Russia, ul. Shkol'naya, 24, Moscow, 109544 Russia*

^d*GEOKARKAS Ltd., ul. Yeletskaya, 22/25, Moscow, 115583 Russia*

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

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

^{###}*E-mail: from.work055@gmail.com*

In spite of the fact that almost everywhere in the territories of historic cities, under the influence of the shortcomings of landscaping, there is a progressive technogenesis of the geological environment and groundwater, which can lead to the destruction of architectural monuments and historically valuable buildings, this problem remains poorly studied. Given the enormous scale of work on the improvement of the historical territories, which is planned to perform under the national projects and municipal programs, the study of this direction to improve the design methodology and engineering surveys as an objective basis for the development of design decisions, is very relevant. For the historical territories of cities that include architectural monuments and valuable buildings, specialized methods of design and engineering and environmental surveys, geoecological monitoring, including measures to ensure the preservation of cultural heritage, are necessary. The article provides a review of literary sources, analysis of examples, and actual data confirming the impact of landscaping factors on the state of cultural heritage sites (CHS). The most significant in terms of the impact on the geological environment and, accordingly, on the preservation of monuments of architecture are the shortcomings of vertical planning and drainage. In the conditions of high-density housing development, the unsatisfactory improvement can stimulate the processes of underflooding, suffosion, and karst, as well as the general technogenesis of soils, and loss of the bearing capacity of the bases and foundations. Underflooding of basements, “soaking” of walls, and formation of cracks on facades can be observed in architectural monuments and historical buildings. The study summarizes the observations and results obtained by the authors – representatives of various specialties (engineers, geologist, architect-restorer) at various stages of their creative work and takes into account the long experience of ООО “IGBI” on the design of improvement on the historical territories of Moscow.

Keywords: *technogenesis of geological environment, historical areas, preservation of cultural heritage, impact of landscaping, drainage, waterlogging, destruction of architectural monuments, geo-ecological surveys and activities*

REFERENCES

1. Belyaeva, E.L. *Osobennosti blagoustroystva i ozeleneniya istoricheskikh gorodov. Podkhody i metodicheskie rekomendatsii* [Features of landscaping and gardening of historic cities. Approaches and methodological recommendations]. Moscow, Econ-Inform Publ., 2021. 270 p. (in Russian)
2. Belyaeva, E.L. *Metodologiya i metodika proektirovaniya blagoustroystva i ozeleneniya istoricheskikh gorodov. Ch.1. Nauchnoe sodержanie informatsionno-analiticheskoi modeli proektirovaniya blagoustroystva i ozeleneniya istoricheskikh gorodov* [Methodology and design techniques of landscaping and planting of historical cities. Part 1. Scientific content of information analytical model of landscaping and gardening design of historic cities]. Academia. Arkhitektura i stroitel'stvo, 2022, no. 2, pp. 59–68. (in Russian)
3. Belyaeva, E.L. *Metodologiya i metodika proektirovaniya blagoustroystva i ozeleneniya istoricheskikh gorodov. Ch.2. Ispol'zovanie kartograficheskikh metodov i razrabotka informatsionno-analiticheskikh modelei* [Methodology and methods of design of landscaping and gardening of historic cities. Part 2. The use of mapping methods and the development of information-analytical models]. Academia. Arkhitektura i stroitel'stvo, 2022, no. 3, pp. 77–87. (in Russian)
4. Gladkov, V.Yu. *Armirovanie zernistykh osnovanii nezhestkikh dorozhnykh odezhd geotekstil'nyimi prosloikami v vide setok* [Reinforcement of granular bases of non-rigid road pavements by geotextile interlayers in the form of nets]. Extended Abstract of Cand. (Techn.) Sci.

- Dissertation. Moscow, SoyuzDorNII, 1985. (in Russian)
5. Kazarnovskii, V.D. *Sinteticheskie netkanye materialy v transportnom stroitel'stve* [Synthetic nonwoven materials in transport construction]. Moscow, Transport Publ., 1984. (in Russian)
 6. Kashperuk, P.I., Yulin, A.N. *Kachestvo inzhenernykh izyskaniy kak faktor formirovaniya ustoichivyykh prirodno-tekhnogennykh sistem* [Quality of engineering surveys as a factor in the formation of sustainable natural and man-made systems]. *Vestnik MGSU*, 2014, no. 1, pp. 83–89. (in Russian)
 7. Kashperuk, P.I., Nikitina, K.V. *K voprosy o karstovo-suffozionnykh proyavleniyakh karstuyushchikhsya tolshchakh g. Moskvy* [On the karst-suffosion manifestation in karst strata of Moscow]. Proc. Intern. Workshop dedicated to the 70th anniversary of Dr. Sci. Prof. V.P. Khomenko, 2019, pp. 40–42. (in Russian)
 8. Knyazeva, V.P. *Ekologiya. Osnovy restavratsii* [Ecology. Fundamentals of restoration]. Moscow, Arkhitektura-S Publ., 2005, 400 p. (in Russian)
 9. Moskva. *Geologiya i gorod* [Moscow. Geology and the city]. V.I. Osipov, O.P. Medvedev, Eds. Moscow, Moskovskie uchebniki i kartografiya Publ., 1997. 350 p. (in Russian)
 10. Olen'kov, V.D. *Metodologicheskie osnovy vosstanovleniya i ispol'zovaniya narushennykh territoriy dlya gradostroitel'stva s uchetom aeratsionnogo rezhima na primere Chelyabinskoy oblasti* [Methodological bases of restoration and use of disturbed territories for urban development taking into account the aeration regime by the example of Chelyabinsk region]. Doctoral Sci. (Techn.) Dissertation. Moscow, MGSU, 2019. (in Russian)
 11. Orlov, M.S., Pit'eva K.E. *Gidrogeologiya gorodov* [Hydrogeocology of cities]. Moscow, INFRA-M Publ., 2013. 397 p. (in Russian)
 12. Pashkin, E.M. *Inzhenernaya geologiya (dlya restavratorov)* [Engineering geology (for restorers)]. Moscow, Arkhitektura-S Publ., 2005. 264 p. (in Russian)
 13. Pashkin, E.M. *Inzhenerno-geologicheskaya diagnostika deformatsii pamyatnikov arkhitektury* [Engineering-geological diagnostics of deformations of architectural monuments]. Moscow, Traditsiya Publ., 2022, 352 p. (in Russian)
 14. Khomenko, V.P. *Zakonomernosti i prognoz suffozionnykh protsessov* [Laws and prediction of suffosion processes]. Moscow, GEOS Publ., 2003, 216 p. (in Russian)
 15. Shepelev, N.P., Shumilov, M.S. *Rekonstruktsiya gorodskoi zastroiki* [Reconstruction of urban development]. Moscow, Vysshaya shkola, 2008, 270 p. (in Russian)
 16. Shumeev, P.A. *Gradoekologicheskoe obespechenie sokhraneniya istoricheskoi zastroiki na osnove monitoringa sredey: na primere g. Rostova-na-Donu* [Urban ecological support of historical building preservation on the basis of environmental monitoring: on the example of Rostov-on-Don]. Extended Abstract of Cand. Sci. (Techn.) dissertation, Moscow, 2014. 20 p.

ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ ПРИРОДНЫХ И ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 502.2.05

ВЛИЯНИЕ ТЕКТОНИЧЕСКИХ УЗЛОВ СЕВЕРА РУССКОЙ ПЛИТЫ НА СОСТОЯНИЕ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ НА МИКРОУРОВНЕ (НА ПРИМЕРЕ СОДЕРЖАНИЯ АСКОРБИНОВОЙ КИСЛОТЫ В ПЛОДАХ ЧЕРНИКИ И БРУСНИКИ)

© 2023 г. В. В. Старицын¹, Ю. Г. Кутинов¹, Е. В. Полякова^{1,*},
З. Б. Чистова¹, А. Л. Минеев¹

¹ФГБУН Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики
им. академика Н.П. Лаверова УрО РАН,
пр. Никольский, 20, Архангельск, 163012 Россия

*E-mail: lenpo26@yandex.ru

Поступила в редакцию 20.12.2022 г.

После доработки 01.02.2023 г.

Принята к публикации 13.02.2023 г.

Исследование является дополнением к циклу статей о результатах мониторинговых исследований влияния тектонических узлов на состояние окружающей среды региона. Узлы тектонических дислокаций являются связующим звеном между абиотической (геологической) и биотической средами и оказывают существенное воздействие на состояние растительного покрова, как на макро-, так и на микроуровнях. В статье показана закономерность содержания аскорбиновой кислоты ($C_6H_8O_6$ витамин С) в плодах черники и брусники в зависимости от пространственного нахождения кустарничков в пределах тектонического узла. Выявлено, что концентрации витамина С в ягодах, отобранных в центре и на периферии тектонических узлов, отличаются. Например, его содержание в плодах черники из центра Холмогорского тектонического узла и на 37% больше, чем в ягодах с периферии этого же узла. В плодах черники из центра Плесецкого тектонического узла витамина С на 59%, а в ягодах брусники – на 62% больше по сравнению с периферией; ягоды брусники из центра Вельско-Устьянского тектонического узла содержат витамина С – на 58% больше, чем плоды, произрастающие на его периферии. Упомянутые тектонические узлы отличаются друг от друга по геоморфометрическим, геологическим, тектоническим и ряду других признаков, что позволяет сделать вывод о влиянии глубинных факторов на состояние окружающей среды в целом и на концентрации витамина С в плодах черники и брусники, в частности.

Ключевые слова: межгеосферное взаимодействие, тектонический узел, окружающая среда, аскорбиновая кислота (витамин С), черника (*Vaccinium myrtillus* L.), брусника (*Vaccinium vitis-idaea* L.)

DOI: 10.31857/S086978092302008X, EDN: TWOXDY

ВВЕДЕНИЕ

В статье [19] дано следующее определение геоэкологии: “Геоэкология – это наука, изучающая геосферные оболочки Земли, компоненты окружающей среды и минеральную основу биосферы и происходящие в них изменения под влиянием природных и техногенных факторов”, т.е. в первую очередь объектами изучения являются межгеосферные процессы. В научной литературе существуют многочисленные свидетельства взаимодействия литосферы с биосферой и атмосферой на площади тектонических нарушений. Приводимые факты довольно часто имеют разрозненный характер, и, как правило, не являются результатом многолетних мониторинговых наблюдений. Авторами в течение более 20 лет про-

водились исследования межгеосферных процессов в области развития тектонических узлов [11]. Поскольку они являются связующим звеном между абиотической (геологической) и биотической средами, то оказывают существенное влияние на состояние растительного покрова как на макро-, так и на микроуровнях [11, 12]. Это обусловлено не только прямым воздействием структур геологической среды (литосферы), но и косвенным (триггерные и спровоцированные эффекты) за счет влияния на процессы, происходящие в атмосфере.

Для анализа влияния тектонических узлов на состояние окружающей среды было необходимо выбрать репрезентативный для приарктических территорий России. Им является территория Ар-

хангельской области, исходя из следующих ее характеристик: 1) она входит в состав Русской равнины, имеющей сходные геоморфологические режимы с Западно-Сибирской равниной [4] и Среднесибирским плоскогорьем, занимающими суммарно более 60% территории России; 2) регион расположен на территории Европейского Севера и охватывает основные геолого-географические и биоклиматические типы формирования природных комплексов от типичной тундры до типичных ландшафтов средней полосы России [17]; 3) входит в состав единого Арктического минерагенического пояса [15] и имеет общие геохимические характеристики земной коры [1]; 4) в современном геодинамическом плане она является частью общей области динамического влияния зоны Арктического спрединга [9]. Все это дает возможность для широкомасштабных сопоставительных исследований, результаты которых могут быть распространены на все платформенные территории РФ.

Цель исследования — оценить влияние тектонических узлов на содержание витамина С в биоматериале. В качестве биотической составляющей эксперимента были выбраны плоды черники (*Vaccinium myrtillus* L.) и брусники (*Vaccinium vitis-idaea* L.), поскольку данные виды являются доминантными в травяно-кустарничковом ярусе таежных лесов Архангельской области. Кроме того, они имеют короткий вегетационный период, что дает возможность оценить эффект накопления микроэлементов в плодах в зависимости от пространственной приуроченности к тектоническому узлу в течение летнего полевого сезона.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Район исследований пространственно находится на севере Русской плиты и административно совпадает с территорией Архангельской области. Геологическое строение, структура разломов и тектонических узлов, а также характер современного рельефа региона подробно рассмотрены в монографиях авторов [8, 9, 14], поэтому в данной статье затрагиваются кратко. На архейском кристаллическом фундаменте с угловым и стратиграфическим несогласиями залегают породы осадочного чехла, слагающие два тектоно-вещественных мегакомплекса: рифтогенный (отложения рифея) и плитный (венд-фанерозойские отложения). Современный рельеф региона является результатом материковых оледенений (днепровского, московского, валдайского), послеледниковой эрозии и тектонических процессов. В целом его структура представляет собой сочетание форм доледникового денудационно-тектонического, ледникового и послеледникового аккумулятивного и эрозионного генезиса. Последнее

валдайское оледенение (10–12 тыс. лет назад) дополнило древний рельеф многочисленными моренными холмами, грядами и возвышенностями с обширными низинами. В целом территория представляет собой пологую, слегка волнистую равнину, постепенно понижающуюся к Северному Ледовитому океану и разделенную равнинами крупных рек. Абсолютные отметки рельефа редко превышают 200 м.

Рассматриваемые тектонические нарушения были заложены в позднем архее (2600–2800 млн. лет) и в домезозойский период пережили от 4 до 10 этапов активизации [12]. Они пересекают практически весь геологический разрез от фундамента до верхних слоев осадочного чехла. На уровне фундамента разломы играли структурообразующую роль, формируя блоковое строение его кровли. В осадочном чехле большинству разломов соответствуют узкие зоны трещиноватости с амплитудой первые десятки метров и флексуобразные перегибы. В верхней части разреза наблюдаются палеодолины сложного строения с глубиной врезки до 200 м, являющиеся “гидрогеологическими окнами” [11].

Ранее на территории Архангельской области было выделено 18 тектонических узлов, отличающихся друг от друга порядком, размерами, формами и количеством образующих их пересечений (рис. 1).

Анализируемые узлы образованы пересечениями архейских разломов (и соответствующих им зон трещиноватости в осадочном чехле) и могут рассматриваться как одновозрастные образования. Методика выделения узлов подробно рассмотрена в работах авторов [11, 14]. При этом использовались практически все имеющиеся на исследуемую территорию геолого-геофизические материалы (рис. 2), которые в дальнейшем были дополнены геоморфометрическим анализом цифровой модели рельефа (ЦМР) ASTER GDEM V2, подготовленной по авторским методикам [8].

Тектонические узлы образованы пересечениями рифейских грабенов северо-западного и трансблоковых зон меридионального и северо-восточного простираний. Особенность методики выделения систем разломов и тектонических узлов заключается в том, что выделяются не осевые линии разломов, а площади их динамического влияния (по участкам сгущения линейных элементов). Учитывая масштаб исходных материалов (1:200 000), вынесение зон динамического влияния разломов на Схему расположения тектонических узлов на территории Архангельской области (см. рис. 1) делает ее нечитаемой.

Для уточнения воздействия тектонических узлов и отделения их влияния от других факторов, необходимо было “отсечь” эти (другие) факторы. Эта задача решалась следующим образом. Было

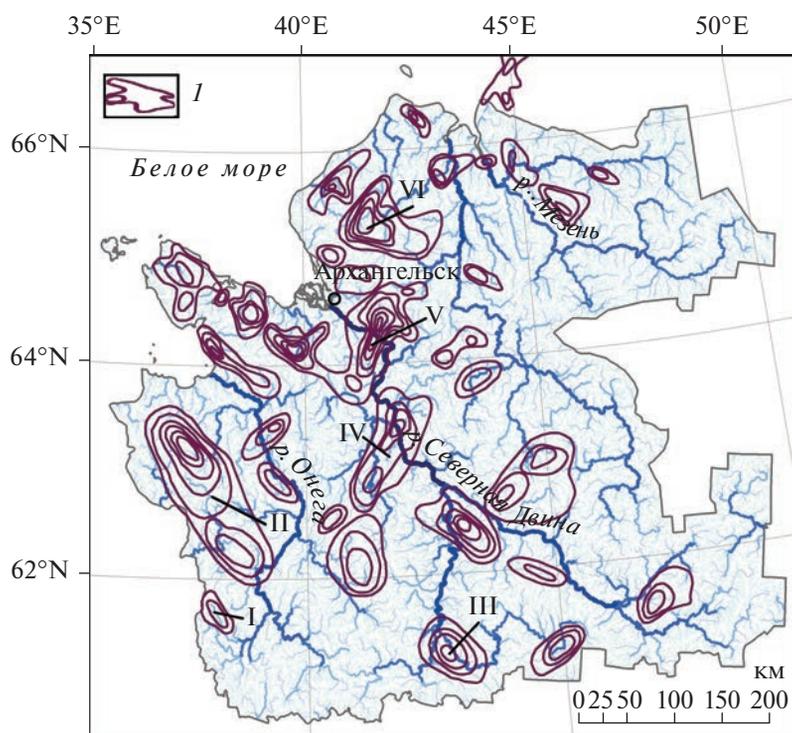


Рис. 1. Схема расположения тектонических узлов на территории Архангельской области. I – изолинии плотности тектонического нарушения; римские цифры – исследованные тектонические узлы: I – Лекшмозерский, II – Кенозерский (Плесецкий), III – Вельско-Устьянский, IV – Емецкий, V – Холмогорский, VI – Зимнеберезный.

необходимо дифференцировать тектонические узлы и выбрать отличные друг от друга по ряду основных параметров. В этом случае при доминирующем вкладе тектонических узлов наблюдаемые эффекты в растительном покрове должны быть идентичными или схожими, в противном случае они должны значительно различаться. Как отмечалось ранее, в качестве индикатора растительного покрова на микроуровне было выбрано содержание аскорбиновой кислоты (витамина С) из-за достаточно короткого срока ее накопления в ягодах черники и брусники.

Для разделения тектонических узлов нами учитывались характеристики земной коры и геоморфометрические параметры рельефа, а также взаимосвязи между ними.

Для оценки характеристик земной коры были рассчитаны: коэффициент дискретности и энергоемкость мегаблоков, плотность разломов и функция дробления земной коры [7], отражающие энергетические параметры последней и ее предрасположенность к блоковому делению.

В дальнейшем по авторской методике [14] был проведен анализ отражения структур кристаллического фундамента в современном рельефе (рис. 3А, Б, В).

Для разделения тектонических узлов по геоморфометрическим параметрам по каждому из 18 узлов были подготовлены векторные слои с полигонами границ периферии узла, всех промежуточных пересечений и центра узла [11] и по границе каждого полигона из ЦМР были подготовлены цифровые модели узлов и всех пересечений внутри узла (модуль “Clip Grid With Polygon” из программного обеспечения SAGA GIS).

По разработанным авторами методикам [14] были проведены расчеты площадного распределения высотных отметок рельефа (см. рис. 3Г), индекса расчлененности и углов наклона на площади тектонических узлов. Показано, что по распределению значений высот тектонические узлы на территории области можно разделить на три крупные группы (см. рис. 3Г). Первая группа – узлы, занимающие значительную площадь (до 160 тыс. ячеек, при размере ячейки ЦМР 30×30 м), которая разделяется на две подгруппы: 1а – высоты внутри узла до 150 м, 1б – высоты до 350 м. Вторая группа – узлы средних размеров (средняя площадь узла до 60 тыс. ячеек), также подразделяется на две подгруппы: 2а – высоты до 100 м, 2б – высоты до 250 м. Третья группа – узлы малой площади (до 20 тыс. ячеек) с высотами до 200 м.

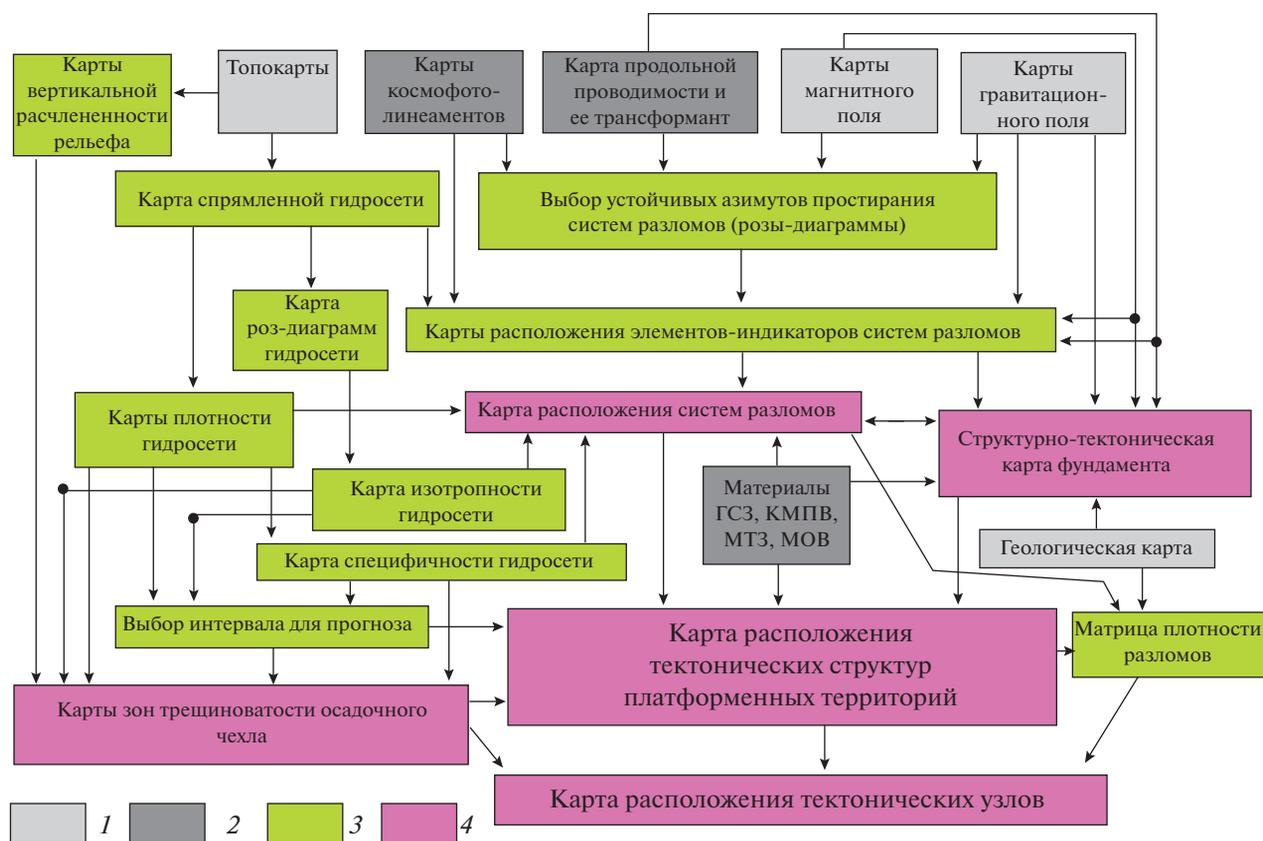


Рис. 2. Алгоритм выделения систем разломов и тектонических узлов, по [13]. 1–2 – архивные материалы: 1 – имеющиеся для всех территорий древних платформ, 2 – не всегда имеющиеся; 3–4 – карты и материалы, получаемые в процессе исследований: 3 – промежуточные, 4 – окончательные.

Таким образом, по перечисленным выше параметрам (как эндогенным, так и геоморфометрическим) узлы отличаются друг от друга.

Сбор плодов черники и брусники для определения содержания витамина С производился в период массового плодоношения (в конце июля – первой половине августа) на трех тектонических узлах – Холмогорском, Плесецком (Кенозерском), Вельско-Устьянском. Для этого закладывались по две пробные площади 25×25 м в центре и на периферии каждого узла, производился равномерный отбор ягод по 500 г с каждой. Далее пробы передавались в ЦКП КТ РФ “Арктика” ФИЦКИА УрО РАН для определения содержания в них витамина С. Определение аскорбиновой кислоты проводилось колориметрическим методом на спектрофотометре UV-1800 (Shimadzu Corporation, Япония) при длине волны 515 нм [21].

РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате проведенных ранее работ для всех исследованных тектонических узлов (см. рис. 1)

отмечены следующие характерные особенности [11]:

- устойчивый “дефицит” атмосферного давления (до 25 Мб) по периферии узлов;
- различная частота и количество выпадающих жидких атмосферных осадков в центре и на периферии (на 26% больше) узлов;
- более раннее выпадение снега, большая мощность снегового покрова и его более позднее таяние на периферии узлов;
- изменение электрической проводимости воздуха, непрохождение сигналов сотовой связи и характер короткопериодных магнитных вариаций;
- увеличение количества гроз (до 4 раз) и, как следствие, лесных пожаров.

Учитывая, что тектонические узлы являются каналами глубинной дегазации и источниками наведенных магнитотеллурических токов [12], зафиксированные явления вполне объяснимы и закономерны. В то же время надо отметить, что над площадью узлов наблюдаются своеобразные климатические особенности, отличающиеся от окружающей территории.

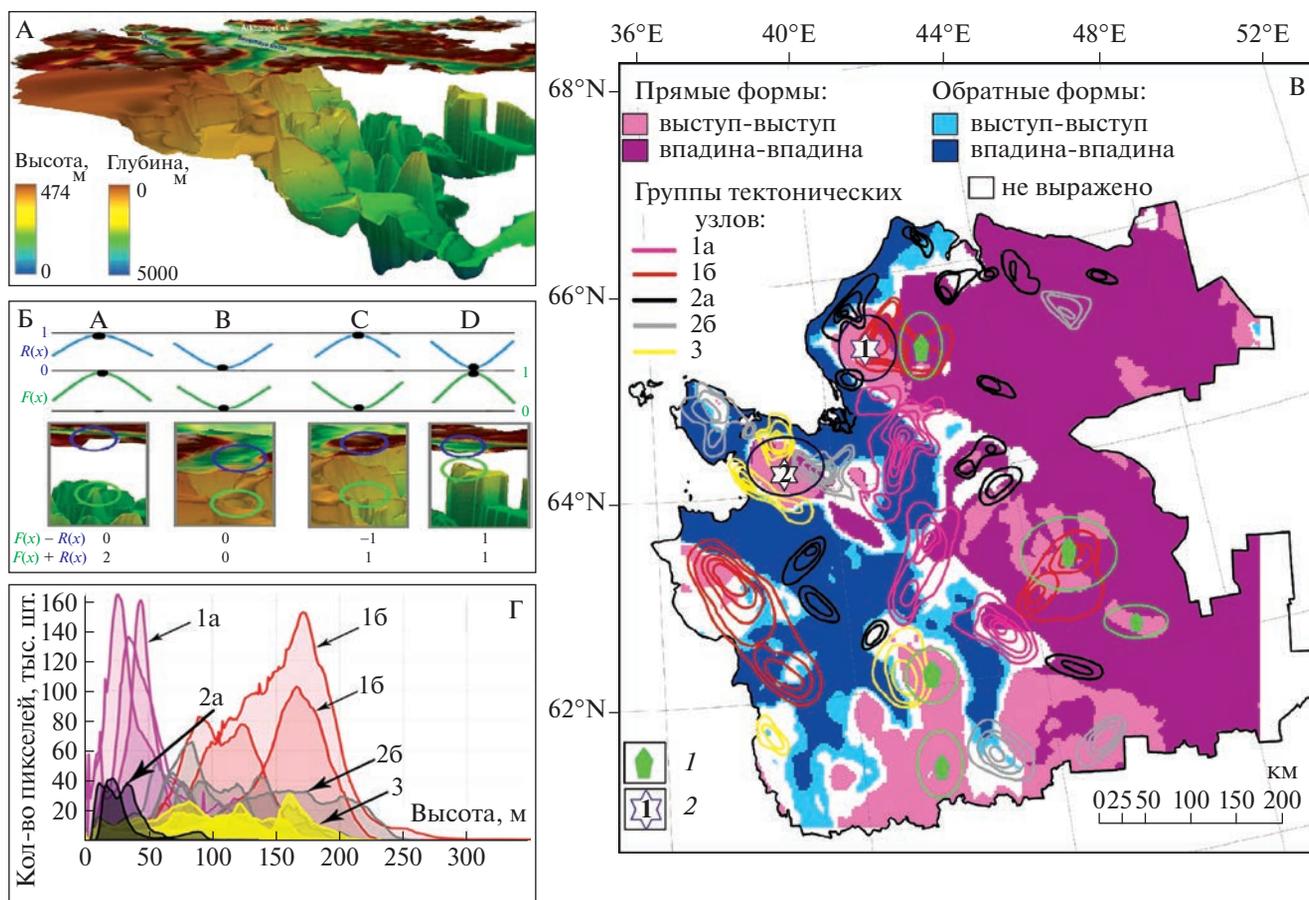


Рис. 3. Разделение тектонических узлов по эндогенным и геоморфометрическим параметрам. А – 3D сопоставление цифровых моделей рельефа и фундамента на территории Архангельской области; Б – разность и сумма нормированных значений функций: А, В – прямые (повторяющиеся); С, D – обратные (противоположные) формы; В – сопоставление форм наследования структур фундамента в современном рельефе и геоморфометрических параметров тектонических узлов с проявлениями кимберлитового магматизма и участками условной вероятности встречи нефтяных и газовых месторождений по неотектоническим данным на площади Мезенской синеклизы: 1 – районы вероятных локализаций нефтяных и газовых месторождений; 2 – районы кимберлитового магматизма: 1 – Зимнебережный кимберлитовый район, 2 – Ненокское и Белозерское поля мелилититов и кимберлитов; Г – распределение высот в группах тектонических узлов: 1 – узлы большой площади, высоты: 1а – до 150 м, 1б – до 350 м; 2 – узлы средней площади, высоты: 2а – до 100 м, 2б – до 250 м; 3 – узлы малой площади.

Влияние на растительный покров выглядит следующим образом:

- на макроуровне – изменение структуры растительного покрова (до 20%), причем наблюдается отчетливая корреляция между степенью изменений и количеством тектонических пересечений, слагающих узел [5]; большее разнообразие растительности в узле;

- на микроуровне – повышенное количество пораженных корневой губкой (*Heterobasidion anomum* Fr.) деревьев [11]; биохимические показатели лишайников, произрастающих на территории тектонического узла и за его пределами, существенно различаются практически по всем показателям в течение всего вегетационного периода [24]; изменение урожайности черники и брусники и содержания химических элементов в плодах

от центра узла к его периферии [20]; различие в толщине клеточной стенки ранней и поздней древесины в центре и на периферии узлов [26].

Таким образом, влияние тектонических узлов на состояние растительного покрова как на макро-, так и на микроуровне можно считать установленным.

В табл. 1 приведено сопоставление характеристик исследованных тектонических узлов. Следует отметить, что среди представленных в данном исследовании трех тектонических узлов Холмогорский территориально является самым северным и относится к подзоне северной тайги, два других – Плесецкий (Кенозерский) и Вельско-Устьянский – расположены южнее и относятся к среднетаежной подзоне. Сходные результаты были получены и по Зимнебережному тектониче-

Таблица 1. Сопоставление характеристик исследованных тектонических узлов

Характеристики	Холмогорский	Плесецкий (Кенозерский)	Вельско-Устьянский
Количество тектонических пересечений	6	3	4
Группа по геоморфометрическим параметрам	1а	3	3
Простирание	Меридиональное	Северо-западное	Изометричный
Порядок тектонических узлов	1	2	2
Мегаблоки и трансблоковые зоны	Беломорский мегаблок	Карельский мегаблок	Карельский мегаблок
Коэффициент дискретности мегаблоков	2.64	2.35	2.35
Удельная энергоёмкость мегаблоков, Дж/м ³	(22–24) × 10 ⁹	(15–17) × 10 ⁹	(15–17) × 10 ⁹
Значения функции дробления	2.3	0.6	1.0
Подстилающие породы осадочного чехла	Венд, алевролиты, аргиллиты	Карбон, известняки	Пермь, красноцветы
Тип рельефа	Денудационное плато (палеозойского возраста), равнина с конечно-моренными всхолмлениями (валдайское оледенение)	Возвышенность, холмисто-моренный	Плато, плоская равнина
Формы отражения структур кристаллического фундамента в современном рельефе (фундамент-рельеф)	Обратная (выступ–впадина)	Обратная (впадина–выступ)	Прямая (выступ–выступ)
Подзона северной тайги	Северная тайга	Средняя тайга	Средняя тайга

скому узлу. Но он был исключен из рассмотрения, так как это район проявления кимберлитового магматизма, в котором проводятся интенсивные горные работы. То есть, во-первых, там достаточно велик вклад антропогенного воздействия; во-вторых, одним из факторов природного воздействия на состояние растительного покрова рядом авторов указывается наличие близ поверхностных интрузивных или эффузивных образований [23].

Принято считать, что на содержание витамина С в плодах черники и брусники оказывают влияние генотип, условия окружающей среды (географическое положение, почва, температура, освещение) [16], биотические и абиотические стрессы [25]. Лимитирующими факторами его накопления выступают температура воздуха и осадки за вегетационный период: чем выше коэффициент экстремальности (соотношение среднемесячных температур к сумме осадков), тем большее его количество концентрируется в плодах [21]. Продолжительность светового дня также сказывается на содержании витамина С в ягодах. Именно такие условия (экстремальность факторов, длительный

летний световой период) характерны для всей территории Архангельской области [21].

Несомненно, что на содержание витамина С в растениях влияет химический состав почвы [6]. Недостаток азота вызывает уменьшение, а обогащение почвы калием, фосфором и марганцем влечет за собой увеличение его концентраций в растениях.

Рассмотрим эти факторы более подробно. Как указывалось выше, на площади тектонических узлов наблюдаются своеобразные климатические и другие особенности, отличающиеся от центра к периферии. На площади выбранных узлов были рассмотрены следующие параметры, приведенные в табл. 2: предрасположенность к протеканию экзогенных процессов; значения высот базисных поверхностей; амплитуда высот разностных поверхностей, плотность облачности с июня по август (вегетационный период).

Важной характеристикой рельефа является также и экспозиция склонов, так как этот параметр определяет их теплообеспеченность и, несомненно, влияет на состояние растительного покрова. Расчет значений экспозиции склонов по-

Таблица 2. Сопоставление поверхностных характеристик исследованных тектонических узлов

Характеристики	Холмогорский	Плесецкий (Кенозерский)	Вельско-Устьянский
Районирование территории на основе кластерного анализа значений углов наклона, LS-фактора, индекса расчлененности рельефа и индекса влажности, по [17]	Склонные к заболачиванию во время паводков	Плоские и волнистые моренные равнины, слабо предрасположенные к развитию эрозионных процессов	Плоские и волнистые моренные равнины, сильно предрасположенные к развитию эрозионных процессов
Значения базиса эрозии, (7 порядок), м*	18	80	56
Разностные поверхности (7–8 порядка), м*	8–12	19–40	56
Средняя (медианная) доля облачности над территорией Архангельской области за период с июня по август 2020 г., данные Sentinel-5P TROPOMI*	0.60–0.64	0.64–0.68	0.48–0.56

*Осредненные данные.

Таблица 3. Средние значения содержания витамина С в плодах черники и брусники

Плоды	Центр	Периферия	Разница, мг/100 г/%
Холмогорский			
Черника	144.30 ± 2.11	105.66 ± 3.18	38.64/36.6
Кенозерский (Плесецкий)			
Черника	55.99 ± 2.00	35.30 ± 5.13	20.69/58.6
Брусника	70.86 ± 4.69	43.70 ± 0.97	27.16/62.1
Вельско-Устьянский			
Брусника	486.74 ± 3.96	308.99 ± 0.37	177.75/57.5

казал достаточно равномерное их распределение без явно доминирующих направлений [14].

Теплообеспеченность склонов можно оценить также по таким топо-климатическим параметрам, как потенциальная солнечная и фотосинтетически активная радиация. Из всего спектра излучения в жизнедеятельности растений наиболее важную роль играет видимое излучение с длиной волны около 0.38–0.71 мкм, называемое фотосинтетически активной радиацией (ФАР) [22]. Пространственное распределение значений ФАР на площади Холмогорского тектонического узла значительно ниже, чем Вельско-Устьянского и Кенозерского ввиду его более северного расположения.

Приуроченность проявлений щелочно-ультраосновного магматизма и участков условной вероятности встречи нефтяных и газовых месторождений к отдельным группам узлов, выделяемых по геоморфометрическим параметрам (см. рис. 3), свидетельствует также, что они отличаются и в геохимическом отношении. То есть теоретически воздействие разных групп узлов на состояние окружающей среды должно отличаться. Такое воздействие будет отражаться и на более

чувствительных к изменениям среды микропоказателях, таких как, например, содержание витамина С в лесных ягодах.

В табл. 3 приведены сведения о содержании витамина С в плодах черники и брусники на территориях Холмогорского [21], Кенозерского (Плесецкого) [20] и Вельско-Устьянского [3] тектонических узлов (в мг/100 г), а также разница в процентах (при принятии значения с периферии как контрольного за 100%). При этом среднее значение влажности плодов не имеет существенного территориального различия (разница между центром и периферией составляет $0.13 \pm 0.06\%$).

Из данных табл. 3 видно, что в пределах всех трех тектонических узлов отмечается увеличение концентраций витамина С в плодах черники и брусники от периферии к центру. Так, для ягод черники из Холмогорского узла разница составляет порядка 39 мг/100 г (37%), Кенозерского (Плесецкого) – 21 мг/100 г (59%) для черники и 27 мг/100 г (62%) для брусники, Вельско-Устьянского – около 178 мг/100 г (58%) в плодах брусники. Следует отметить, что при продвижении на юг концентрация аскорбиновой кислоты в плодах черники и брусники в процентном отношении

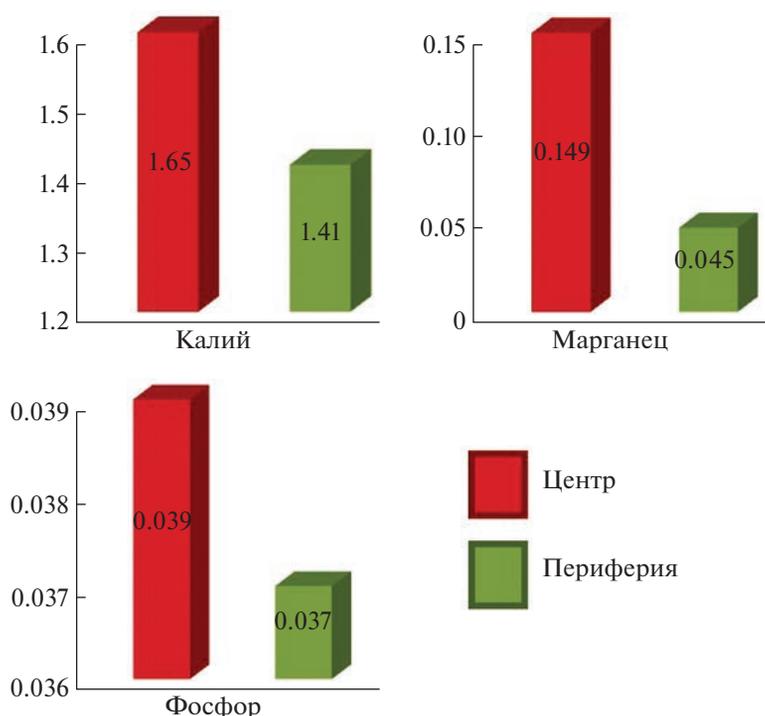


Рис. 4. Распределение микроэлементов в почвах Холмогорского тектонического узла, в процентах, по [21].

увеличивается в 2–3 раза. То есть воздействие климатической зональности отражается в абсолютных значениях содержания витамина С, в то время как влияние тектонических узлов обуславливает его изменение от центра к периферии.

При этом, несмотря на различия в почвах и подстилающих коренных породах, и, как следствие, в их геохимических характеристиках, влияние на содержание витамина С на локальном уровне не просто схоже, а практически идентично. Это, вероятно, обусловлено подтоком глубинных газов и флюидов в области тектонического узла.

В зонах тектонических разломов, а также в узлах пересечений тектонических дислокаций возникают геохимические аномалии, которые, несомненно, вносят изменения в химический состав почв. Так, проведенный анализ почв в центре и на периферии Холмогорского тектонического узла показал различия в процентном соотношении их элементного состава (рис. 4). Наибольшее отличие отмечается для содержания марганца в почве. В центре узла его содержание на 231% больше, чем на периферии (значения на периферии приняты за 100%). Содержание калия в почвах центральной части узла на 17%, а фосфора — на 5% выше по сравнению с почвами периферии [21]. Сходные закономерности наблюдаются и на площади Вельско-Устьянского и Кенозерского тектонических узлов [18, 20].

Интерес представляет также распределение химических элементов в лишайниках на площади Вельско-Устьянского тектонического узла. Отмечается повышение концентрации микроэлементов (P, Si, Ca, Al, Mg, Fe, Na, Cu, Ti, Cr) у лишайников *Usnea Florida*, произрастающих непосредственно в центре узла [24]. Учитывая воздушный тип питания лишайников, вполне корректно предположить существующую глубинную дегазацию по тектоническому узлу, что подтверждается структурой барического поля и характером облачности, а также снижением содержания кислорода в приповерхностном слое атмосферы.

На более локальном уровне, вероятнее всего, изменения в химическом составе почв являются ответственными за различия в концентрациях витамина С в плодах черники и брусники из центра и периферии тектонического узла. Кроме того, ранее авторами инструментально зафиксировано, что в центре узла выпадает меньшее количество жидких атмосферных осадков [2], их количество на 26–38% ниже по сравнению с периферией [10]. Выпадение снега на периферии узла происходит раньше (при большей глубине снежного покрова), а стаяние — позже [10]. Все это снижает сезонное промывание почв и, как следствие, вызывает концентрирование микроэлементов, в том числе и аскорбиновой кислоты в ягодах черники и брусники.

ВЫВОДЫ

Резюмируя все вышесказанное, а также, учитывая предыдущие исследования по данной тематике, можно сделать вывод, что тектонические узлы, как наиболее активные структурообразующие элементы геологической среды, несомненно, оказывают влияние на биологическую составляющую окружающей природной среды.

В районах тектонических узлов формируются участки с аномальными характеристиками свойств окружающей среды, как на количественном, так и на качественном уровнях. Причем эти изменения прослеживаются и по латерали, и по вертикали.

Несмотря на то что исследуемые тектонические узлы отличаются друг от друга по целому ряду параметров, наблюдаются схожие закономерности изменения параметров окружающей среды. В частности, в пределах трех изученных на данный момент тектонических узлов изменяется количественное содержание аскорбиновой кислоты (витамина С) в плодах черники и брусники. В плодах кустарничков, произрастающих в центре узла, концентрации витамина С всегда выше, по сравнению с ягодами с периферии. Так, для ягод черники из Холмогорского узла разница составляет порядка 37%, Плесецкого – 59% для черники и 62% для брусники, Вельско-Устьянского – около 56% в плодах брусники.

Предварительно подобную закономерность можно объяснить глубинной дегазацией по тектоническим узлам, обуславливающую различия в химическом составе почв в центре и на периферии тектонических узлов. Подобная тенденция прослеживается и для других тектонических узлов на территории Архангельской области.

Исследования проведены в рамках государственного задания № 122011300380-5 Федерального исследовательского центра комплексного изучения Арктики им. Н.П. Лаверова Уральского отделения Российской академии наук; а также при поддержке конкурса научных проектов молодых ученых ФГБУН ФИЦКИА УрО РАН, посвященного Десятилетию науки и технологий в Российской Федерации № 122111000008-8.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арктика на пороге третьего тысячелетия (ресурсный потенциал и проблемы экологии) / Под ред. И.С. Грамберга и Н.П. Лаверова. СПб.: Наука, 2000. 247 с.
2. Беляев В.В., Кутинов Ю.Г., Чистова З.Б., Хмара К.А. Влияние узлов тектонических дислокаций на характер выпадения осадков в лесных экосистемах // Вестник ПГУ. Сер. Естественные и точные науки. 2009. № 2. С. 45–50.
3. Беляев В.В., Неверов Н.А., Старицын В.В., Бойцова Т.А. Свойства некоторых компонентов фитоценозов, произрастающих на территориях тектонических узлов (Архангельская область) // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. 2018. № 4 (139). С. 197–204.
4. Бронгулев В.В., Жидков М.П., Макаренко А.Г. Современные геоморфологические режимы Русской и Западно-Сибирской равнин: сходство и различие // ДАН. 2004. Т. 399. № 4. С. 540–544.
5. Гофаров М.Ю., Болотов И.Н., Кутинов Ю.Г. Ландшафты Беломорско-Кулойского плато: тектоника, подстилающие породы, рельеф и растительный покров. Екатеринбург: УрО РАН, 2006. 158 с.
6. Деятинин В.А. Витамины. М.: “Пищепромиздат”, 1948. 280 с.
7. Кутинов Ю.Г., Беленович Т.Я., Чистова З.Б. Дискретность земной коры, энергоемкость блоков и сейсмичность Европейского Севера России // Вестник геонаук. 2021. № 11 (323). С. 16–24. <https://doi.org/10.19110/geov.2021.11.2>
8. Кутинов Ю.Г., Минеев А.Л., Полякова Е.В., Чистова З.Б. Выбор базовой цифровой модели рельефа (ЦМР) равнинных территорий Севера Евразии и ее подготовка для геологического районирования (на примере Архангельской области). Пенза: “Социосфера”, 2019. 176 с.
9. Кутинов Ю.Г. Современный геодинамический режим Арктического сегмента земной коры и нефтегазообразование. Пенза: “Социосфера”, 2021. 281 с.
10. Кутинов Ю.Г., Чистова З.Б., Гофаров М.Ю., Минеев А.Л. Современная тектоническая активность Кандалакшского грабена по комплексу данных // Вестник САФУ. Сер. Естественные науки. 2013. № 4. С. 21–29.
11. Кутинов Ю.Г., Чистова З.Б., Неверов Н.А. Новые данные о влиянии тектонических узлов на состояние окружающей среды на севере Русской плиты // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2020. № 5. С. 12–24.
12. Кутинов Ю.Г., Чистова З.Б. Комплексная модель процессов межгеосферного взаимодействия в тектонических узлах Севера Русской плиты // Альманах Пространство и Время. 2012. Т. 1. Вып. 1. [Электронное научное издание]. URL: <http://e-almanac.space-time.ru/assets/files/rubr1-kora-mantiya-yadro-statya8-kutinovchistova-2012.pdf> (дата обращения 05.12.2022).
13. Кутинов Ю.Г., Чистова З.Б., Полякова Е.В., Минеев А.Л. Цифровое моделирование рельефа для прогноза площадей перспективных на нефть и алмазы // Актуальные проблемы нефти и газа. 2019. Вып. 1 (24). <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2019-24.art8>
14. Кутинов Ю.Г., Чистова З.Б., Полякова Е.В., Минеев А.Л. Применение цифровых моделей рельефа (ЦМР) для выделения тектонических структур древних платформ (на примере северо-запада Русской плиты). Пенза: “Социосфера”, 2020. 378 с.
15. Кутинов Ю.Г. Экогеодинамика Арктического сегмента земной коры. Екатеринбург: УрО РАН, 2005. 388 с.

16. *Лютикова М.Н., Ботиров Э.Х.* Химический состав и практическое применение ягод брусники и клюквы // *Химия растительного сырья*. 2015. № 2. С. 5–27.
<https://doi.org/10.14258/jcprpm.201502429>
17. *Минеев А.Л., Кутинов Ю.Г., Чистова З.Б., Полякова Е.В.* Геоэкологическое районирование территории Архангельской области с использованием цифровых моделей рельефа и ГИС-технологий // *Пространство и Время*. 2017. № 2–3–4 (28–29–30). С. 267–288.
18. *Неверов Н.А., Беляев В.В.* Влияние геоэкологических условий среды на некоторые виды растительных ресурсов Севера // *Евразийское научное объединение*. 2018. № 1 (35). С. 225–228.
19. *Осипов В.И.* Геоэкология – междисциплинарная наука об экологических проблемах геосфер // *Геоэкология*. 1993. № 1. С. 4–18.
20. *Старицын В.В., Беляев В.В.* Урожайность и содержание витамина С в бруснике (*Vaccinium vitis-idaea* L.) и чернике (*Vaccinium myrtillus* L.) в пределах Плесецкого тектонического узла // *Известия высших учебных заведений. Лесной журнал*. 2015. № 1 (343). С. 78–84.
21. *Старицын В.В., Полякова Е.В.* Содержание аскорбиновой кислоты в плодах черники (*Vaccinium myrtillus* L.) в пределах Холмогорского тектонического узла Архангельской области // *Успехи современного естествознания*. 2022. № 6. С. 77–82.
<https://doi.org/10.17513/use.37844>
22. *Тооминг Х.Г., Гуляев Б.И.* Методика измерения фотосинтетически активной радиации. Москва: Наука, 1967. 143 с.
23. *Шитов А.В., Воронков В.Г., Воронкова Е.Г.* Об изучении влияния геологических процессов на биологические системы (на примере Горного Алтая) // *Многообразие современных геологических процессов и их инженерно-геологическая оценка: тр. междунар. научно-практ. конф. М.: МГУ, 2009. С. 30–32.*
24. *Belyaev V.V., Bogolytsyn K.G., Brovko O.S., Kutinov Yu.G. et al.* Influence of tectonic knot on the conditions and properties of some biogeocenosis components in the subarctic area // *European Journal of Environmental Sciences*. 2019. V. 9 (1). P. 5–11.
<https://doi.org/10.14712/23361964.2019.1>
25. *Cocetta G., Karppinen K., Suokas M., Hohtola A. et al.* Ascorbic acid metabolism during bilberry (*Vaccinium myrtillus* L.) fruit development // *J. of Plant Physiology*. 2012. V. 169 (11). P. 1059–1065.
<https://doi.org/10.1016/j.jplph.2012.03.010>
26. *Neverov N.A., Belyaev V.V., Chistova Z.B., Kutinov Y.G. et al.* Influence of morphometric parameters of relief on macro- and microstructure of wood *Pinus silvestris* L. in the North of the Russian plain // *J. of Forest Science*. 2019. № 65. P. 79–85.
<https://doi.org/10.17221/123/2018-JFS>

INFLUENCE OF THE TECTONIC KNOTS IN THE NORTH OF THE RUSSIAN PLATE ON THE ENVIRONMENT STATE AT THE MICROLEVEL (BY THE EXAMPLE OF THE CONTENT OF ASCORBIC ACID IN BLUBERRY AND COWBERRY FRUITS)

V. V. Staritsyn^a, Yu. G. Kutinov^a, E. V. Polyakova^{a, #}, Z. B. Chistova^a, and A. L. Mineev^a

^a*Laverov Federal Center for the Integrated Arctic Research, Ural Branch, Russian Academy of Sciences,
Nikolskii pr. 20, Arkhangelsk, 163012 Russia*

[#]*E-mail: lenpo26@yandex.ru*

The study is an addition to a series of articles on the results of monitoring studies on the impact of tectonic knots on the state of the environment in the region. The knots of tectonic dislocations are a link between the abiotic (geological) and biotic environments, and have a significant impact on the state of vegetation cover, both at the macro and micro levels. This article shows the regularity of the content of ascorbic acid (vitamin C) in blueberries and cowberries, depending on their spatial location within the tectonic knot. It was revealed that the concentrations of vitamin C in berries selected in the center and on the periphery of tectonic knots differ. For example, its content in blueberries from the center of the Kholmogory tectonic knot is 37% higher than in berries from the periphery of the same knot. In the fruits of blueberries from the center of the Plesetsk tectonic knot – by 59%, and in cowberries – by 62% more, compared with the periphery. In the fruits of cowberries from the center of the Velsko-Ustyansky tectonic knot – 58% more. These knots differ from each other in geomorphometric, geological, tectonic factors, etc., which allows us to conclude that deep factors influence the state of the environment in general and the concentration of vitamin C in blueberries and cowberries in particular.

Keywords: *intergeospheric interaction, tectonic knot, environment, ascorbic acid (vitamin C), blueberries (*Vaccinium myrtillus* L.), cowberries (*Vaccinium vitis-idaea* L.)*

REFERENCES

1. *Arktika na poroge tret'ego tysyacheletiya (resursnyi potentsial i problemy ekologii)* [The Arctic on the threshold of the third millennium (resource potential and environmental problems)]. Gramberg, I.S., Laverov, N.P., Eds., St. Petersburg, Nauka Publ., 2000, 247 p. (in Russian)
2. Belyaev, V.V., Kutinov, Yu.G., Chistova, Z.B., Khmara, K.A. *Vliyanie uzlov tektonicheskikh dislokatsii na kharakter vypadeniya osadkov v lesnykh ekosistemakh* [Influence of knots of tectonic dislocations on the character of precipitation in forest ecosystems]. *Vestnik PGU. Ser. Estestvennye i tochnye nauki*, 2009, no. 2, pp. 45–50. (in Russian)
3. Belyaev, V.V., Neverov, N.A., Staritsyn, V.V., Boitsova, T.A. *Svoistva nekotorykh komponentov fitotsenozov, proizrastayushchikh na territoriyakh tektonicheskikh uzlov (Arkhangel'skaya oblast')* [Properties of some components of phytocenoses growing in the territories of tectonic knots (Arkhangelsk region)]. *Vestnik Krasnoyarskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2018, vol. 4 (139), pp. 197–204. (in Russian)
4. Brongulev, V.V., Zhidkov, M.P., Makarenko, A.G. *Sovremennyye geomorfologicheskie rezhimy Russkoi i Zapadno-Sibirskoi ravnin: skhodstvo i razlichie* [Contemporary geomorphological regimes of the Russian and West Siberian plains: similarities and differences]. *DAN*, 2004, vol. 399 (4), pp. 540–544. (in Russian)
5. Gofarov, M.Yu., Bolotov, I.N., Kutinov, Yu.G. *Landshafty Belomorsko-Kuloiskogo plato: tektonika, podstilyayushchie porody, rel'ef i rastitel'nyi pokrov* [Landscapes of the Belomorsko-Kuloi plateau: tectonics, underlying rocks, relief and vegetation]. Yekaterinburg, UrO RAN, 2006, 158 p. (in Russian)
6. Devyatnin, V.A. *Vitaminy* [Vitamins]. Moscow, Pishchepromizdat, 1948, 280 p. (in Russian)
7. Kutinov, Yu.G., Belenovich, T.Ya., Chistova, Z.B. *Diskretnost' zemnoi kory, energoemkost' blokov i seismichnost' Evropeiskogo Severa Rossii* [Discreteness of the Earth's crust, energy intensity of blocks, and seismicity of the European North of Russia]. *Vestnik geonauk*, 2021, vol. 11 (323), pp. 16–24. <https://doi.org/10.19110/geov.2021.11.2> (in Russian)
8. Kutinov, Yu.G., Mineev, A.L., Polyakova, E.V., Chistova, Z.B. *Vybor bazovoi tsifrovoi modeli rel'efa (TsMR) ravninnykh territorii Severa Evrazii i ee podgotovka dlya geologicheskogo raionirovaniya (na primere Arkhangel'skoi oblasti)* [Choice of a basic digital elevation model (DEM) of the plain territories of the North of Eurasia and its preparation for geological zoning (on the example of the Arkhangelsk region)]. Penza, Sotsiosfera, 2019, 176 p. (in Russian)
9. Kutinov, Yu.G. *Sovremennyyi geodinamicheskii rezhim Arkticheskogo segmenta zemnoi kory i neftegazobrazovanie* [Modern geodynamic regime of the Arctic segment of the Earth's crust and oil and gas formation]. Penza, Sotsiosfera, 2021, 281 p. (in Russian)
10. Kutinov, Yu.G., Chistova, Z.B., Gofarov, M.Yu., Mineev, A.L. *Sovremennaya tektonicheskaya aktivnost' Kandalakshskogo grabena po kompleksu dannykh* [Modern tectonic activity of the Kandalaksha's graben according to the data set]. *Vestnik SAFU. Ser. Estestvennye nauki*, 2013, no. 4, pp. 21–29. (in Russian)
11. Kutinov, Yu.G., Chistova, Z.B., Neverov, N.A. *Novyye dannyye o vliyaniy tektonicheskikh uzlov na sostoyaniye okruzhayushchei sredy na severe Russkoi plity* [New data on the impact of tectonic knots on the state of the environment in the north of the Russian Plate]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5. Geografiya*, 2020, no. 5, pp. 12–24. (in Russian)
12. Kutinov, Yu.G., Chistova, Z.B. *Kompleksnaya model' protsessov mezhgeosfer'nogo vzaimodeystviya v tektonicheskikh uzlakh Severa Russkoi plity* [Complex model of processes of intergeospheric interaction in tectonic knots of the North of the Russian plate]. *Al'manakh Prostranstvo i Vremya*, 2012, vol. 1 (1). URL: <http://e-almanac.space-time.ru/assets/files/rubr1-kora-mantiya-yadro-statya8-kutinovchistova-2012.pdf> (data obrashcheniya 05.12.2022). (in Russian)
13. Kutinov, Yu.G., Chistova, Z.B., Polyakova, E.V., Mineev, A.L. *Tsifrovoye modelirovaniye rel'efa dlya prognoza ploshchadei perspektivnykh na nef't' i almazy* [Digital elevation modeling for forecasting areas promising for oil and diamonds]. *Aktual'nye problemy nef'ti i gaza*, 2019, vol. 1 (24). <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2019-24.art8> (in Russian)
14. Kutinov, Yu.G., Chistova, Z.B., Polyakova, E.V., Mineev, A.L. *Primeneniye tsifrovyykh modelei rel'efa (TsMR) dlya vydeleniya tektonicheskikh struktur drevnikh platform (na primere severo-zapada Russkoi plity)* [Application of digital elevation models (DEMs) to identify tectonic structures of ancient platforms (on the example of the north-west of the Russian plate)]. Penza, Sotsiosfera, 2020, 378 p. (in Russian)
15. Kutinov, Yu.G. *Ekogeodinamika Arkticheskogo segmenta zemnoi kory* [Ecogeodynamics of the Arctic segment of the earth's crust]. Yekaterinburg, UrO RAN, 2005, 388 p. (in Russian)
16. Lyutikova, M.N., Botirov, E.Kh. *Khimicheskii sostav i prakticheskoye primeneniye yagod brusniki i klyukvy* [Chemical composition and practical application of cowberry and cranberry berries]. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2015, no. 2, pp. 5–27. <https://doi.org/10.14258/jcprm.201502429> (in Russian)
17. Mineev, A.L., Kutinov, Yu.G., Chistova, Z.B., Polyakova, E.V. *Geoekologicheskoye raionirovaniye territorii Arkhangel'skoi oblasti s ispol'zovaniyem tsifrovyykh modelei rel'efa i GIS-tekhnologii* [Geoecological zoning of the territory of the Arkhangelsk region using digital elevation models and GIS technologies]. *Prostranstvo i Vremya*, 2017, vol. 2–3–4 (28–29–30), pp. 267–288. (in Russian)
18. Neverov, N.A., Belyaev, V.V. *Vliyanie geoekologicheskikh uslovii sredy na nekotorye vidy rastitel'nykh resursov Severa* [Influence of geoecological environmental conditions on some types of plant resources of the North]. *Evraziyskoye nauchnoye ob'edineniye*, 2018, vol. 1 (35), pp. 225–228. (in Russian)
19. Osipov, V.I. *Geoekologiya – mezhdistsiplinarnaya nauka ob ekologicheskikh problemakh geosfer* [Geoecology as an interdisciplinary science about the environmental problems of the geospheres]. *Geoekologiya*, 1993, no. 1, pp. 4–18. (in Russian)
20. Staritsyn, V.V., Belyaev, V.V. *Urozhainost' i sodержaniye vitamina C v brusnike (Vaccinium vitis-idaea L.) i*

- chernike (Vaccinium myrtillus L.) v predelakh Plesetskogo tektonicheskogo uzla* [Productivity and content of vitamin C in lingonberries (*Vaccinium vitis-idaea* L.) and blueberries (*Vaccinium myrtillus* L.) within the Plesetsk tectonic knot]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Lesnoi zhurnal*, 2015, vol. 1 (343), pp. 78–84. (in Russian)
21. Staritsyn, V.V., Polyakova, E.V. *Soderzhanie askorbinoi kisloty v plodakh cherniki (Vaccinium myrtillus L.) v predelakh Kholmogorskogo tektonicheskogo uzla Arkhangel'skoi oblasti* [The content of ascorbic acid in blueberries (*Vaccinium myrtillus* L.) within the Kholmogory tectonic knot of the Arkhangelsk region]. *Uspekhi sovremenogo estestvoznaniya*, 2022, no. 6, pp. 77–82. <https://doi.org/10.17513/use.37844> (in Russian)
 22. Tooming, Kh.G., Gulyaev, B.I. *Metodika izmereniya fotosinteticheski aktivnoi radiatsii* [Technique for measuring photosynthetically active radiation]. Moscow, Nauka Publ., 1967, 143 p. (in Russian)
 23. Shitov, A.V., Voronkov, V.G., Voronkova, E.G. *Ob izuchenii vliyaniya geologicheskikh protsessov na biologicheskie sistemy (na primere Gornogo Altaya)* [On the study of the influence of geological processes on biological systems (by the example of Gorny Altai)]. *Mnogobrazie sovremennykh geologicheskikh protsessov i ikh inzhenerno-geologicheskaya otsenka: tr. mezhdunar. nauchno-prakt. konf.* Moscow, MGU Publ., 2009, pp. 30–32. (in Russian)
 24. Belyaev, V.V., Bogolytsyn, K.G., Brovko, O.S., Kutinov, Yu.G. et al. Influence of tectonic knot on the conditions and properties of some biogeocenosis components in the subarctic area. *European Journal of Environmental Sciences*, 2019, vol. 9 (1), pp. 5–11. <https://doi.org/10.14712/23361964.2019.1>
 25. Cocetta, G., Karppinen, K., Suokas, M., Hohtola, A. et al. Ascorbic acid metabolism during bilberry (*Vaccinium myrtillus* L.) fruit development. *J. of Plant Physiology*, 2012, vol. 169 (11), pp. 1059–1065. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2012.03.010>
 26. Neverov, N.A., Belyaev, V.V., Chistova, Z.B., Kutinov, Y.G. et al. Influence of morphometric parameters of relief on macro- and microstructure of wood *Pinus silvestris* L. in the North of the Russian plain. *J. of Forest Science*, 2019, no. 65, pp. 79–85. <https://doi.org/10.17221/123/2018-JFS>

ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ ПРИРОДНЫХ И ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 556.388

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОД ДАЛДЫНСКОГО КИМБЕРЛИТОВОГО ПОЛЯ ДЛЯ ЗАКАЧКИ ДРЕНАЖНЫХ ВОД ТРУБОК ЗАРНИЦА И УДАЧНАЯ

© 2023 г. А. М. Янников^{1,*}

¹Институт “Якутнипроалмаз” АК АЛРОСА (ПАО),
ул. Ленина, 39, Мирный, Республика Саха (Якутия), 678174 Россия

*E-mail: yannikov90@mail.ru

Поступила в редакцию 26.01.2023 г.

После доработки 11.02.2023 г.

Принята к публикации 27.02.2023 г.

Проблема экологически безопасной утилизации дренажных вод, возникающих при отработке коренных месторождений алмазов, на настоящий момент приобретает все большую значимость в связи с необходимостью снижения техногенной нагрузки на окружающую среду и с введением новых экологически безопасных методик и технических решений. Дренажные воды Далдынского кимберлитового поля в разные периоды отработки закачивались в участки Октябрьский (1985–2002 гг.), Киенгский (2003–2012 гг.), Левобережный (2012–2023 гг.), в настоящее время эксплуатируется участок Левобережный-2. Вследствие исчерпания полезной емкости существующих участков закачки были поставлены задачи – определить возможности дальнейшего использования коллекторов толщи многолетнемерзлых пород на площади работ, выделить и оценить наиболее перспективные для будущей закачки участки. В качестве объектов исследования выступают толщи верхнекембрийских отложений, залегающие в подошвенной части толщи многолетнемерзлых пород, ниже главных базисов эрозии территории исследований. С учетом анализа имеющейся информации по криогидрогеологическому, литолого-фациальному и структурно-геологическому строению изучаемой территории была составлена прогнозная карта участков, перспективных для геологического изучения и дальнейшей опытной эксплуатации, с оценкой их полезных объемов. При прогнозируемых притоках дренажных вод строительство выделенных участков позволит дополнительно закачать ~40 млн м³, что обеспечит дальнейшую экологически безопасную отработку месторождений Далдынского кимберлитового поля до середины 30-х годов XXI в. Рассматриваемый способ закачки дренажных вод может быть использован в смежных областях горной промышленности при отработке не только кимберлитовых трубок, но и других твердых полезных ископаемых в условиях криолитозоны.

Ключевые слова: Далдынское кимберлитовое поле, трубка Зарница, трубка Удачная, природные рассолы, участки закачки

DOI: 10.31857/S0869780923020108, **EDN:** TWUQDS

ВВЕДЕНИЕ

В пределах Далдынского кимберлитового поля в настоящее время статус месторождений имеют трубки Зарница и Удачная. Трубка Зарница – это первое коренное месторождение алмазов, открытое на территории нашей страны 21 августа 1954 г. Л.А. Попугаевой. Месторождение в настоящее время обрабатывается карьером, в конце 2026 г. предполагается вскрытие подмерзлотных рассолов. Ресурсный потенциал месторождения позволяет рассматривать его отработку как минимум до 2032 г. В 1955 г. советским геологом Амакиным до ГРЭ В.Н. Щукиным было открыто крупнейшее в нашей стране коренное месторождение алмазов – трубка Удачная. Уникальный ресурсный потенциал месторождения предопределил двух-

этапность его отработки: верхняя часть до глубины 640 м отработана карьером в период 1971–2014 гг., с 2015 г. отработка подкарьерных запасов продолжена подземным способом. Ресурсный потенциал месторождения позволяет вести добычу подземным способом до глубин свыше 1600 м от дневной поверхности, т.е. как минимум до 2070 г.

При строительстве карьера Удачный в начале 1980-х годов были вскрыты высокоминерализованные природные рассолы, что потребовало разработки методов и технологий обращения с ними. В результате комплекса работ, проведенного специалистами Амакинской ГРЭ, Мирнинской ГРЭ, ИЗК СО РАН и Института Якутнипроалмаз, было обосновано и доказано, что наиболее пер-

спективный способ утилизации дренажных рассолов — их закачка в недра, причем для этого было предложено использовать толщу многолетнемерзлых пород (ММП) [2, 4, 8–10].

Данный метод успешно опробован на участке Октябрьский, и в последующем тиражирован на участках Киенгский, Левобережный и Левобережный-2. По той причине, что месторождения Далдынского кимберлитового поля на своем “жизненном цикле” будут и дальше формировать дренажные воды, подлежащие закачке, а полезная емкость участков, использующих толщу ММП, является конечной, был выполнен прогноз возможности дальнейшего использования коллекторов толщи ММП, выделены и оценены наиболее перспективные площади. Для выделения подходящих зон необходимо проанализировать опыт эксплуатации существующих участков закачки, оценить поведение сформированного техногенного водоносного горизонта, выделить поисковые критерии структур, пригодных для закачки дренажных вод, определить их полезную емкость.

Геологические условия Далдынского кимберлитового поля

В пределах Далдынского кимберлитового поля геологические условия в разрезе существенно различаются. Осадочный чехол сложен преимущественно карбонатными породами венда и кембрия, терригенно-карбонатные породы находятся в подчиненном положении, галогенные практически полностью отсутствуют (не более 0.1%). Общая мощность осадочной толщи поля изменяется от 2420 до 2478 м [14].

Вмещающие породы непосредственно в интервалах отработки +350/–1500 м коренных месторождений алмазов представлены породами манькайской (E_1 mp) в отм. –1400/–1500 м, эмяксинской (E_1 em) в отм. –1200/–1400 м, кумахской (E_1 k) в отм. –1070/–1200 м, удачнинской (E_{1-2} ud) в отм. –570/–1070 м, нерасчлененной известняково-доломитовой толщи (E_2 id) в отм. –170/–570 м, мархинской (E_3 mg) в отм. +230/–170 м и моркокинской (E_3 mgk) в отм. +350/+230 м свит. Перекрывающие породы в отм. +370/+350 м представлены маломощными терригенными отложениями четвертичного возраста и частично, как правило, на водоразделах, вулканогенными породами триаса [12].

Структурные этажи разделены между собой перерывами в осадконакоплении, угловыми и стратиграфическими несогласиями.

Нижнепалеозойские породы частично перекрыты вулканогенными породами триаса и отложениями четвертичного возраста. Магматические образования пользуются незначительным

распространением и представлены невыходящими на поверхность силлами и дайками долеритов, выполняющими региональные разломы [12].

Структурная позиция Далдынского кимберлитового поля определяется положением его в пределах Далдынской флексуры, разбитой на блоки Вилуйско-Мархинской зоной глубинных субмеридиональных разломов, контролирующих среднепалеозойский трапповый магматизм. В пределах флексуры выделяются разноплановые типы пликативных и дизъюнктивных дислокаций. Через всю территорию с СЗ на ЮВ (по азимуту 165°) протягивается Силигиро-Мархинский разлом, выделенный в кристаллическом фундаменте по результатам геофизических исследований. Разлом прослеживается в фундаменте и нижней части осадочного чехла по штокообразным интрузиям основного состава. Моноклираль осадочных пород осложнена крупной Далдынской флексурой, протягивающейся с СЗ на ЮВ. Северо-восточное ее крыло приподнято, а юго-западное опущено; залегание пород на крыльях субгоризонтальное. Непосредственно трубка Удачная расположена в опущенном крыле Далдынской флексуры. Через территорию исследования протягивается крупный Октябрьский разлом, прослеживающийся через всю площадь по азимуту 300°–315°, в отметках нижнекембрийских отложений он представлен серией сближенных сбросов, суммарная амплитуда которых колеблется в пределах 50–150 м. Так же выделяются более мелкие региональные и кимберлитконтролирующие разломы.

Гидрогеологические условия Далдынского кимберлитового поля

Гидрогеологические условия Далдынского кимберлитового поля определяются его принадлежностью к сочленению Оленекского и Верхневилуйского артезианских бассейнов [1, 6]. По причине незначительности влияния, а также отсутствия перспектив использования надмерзлотных и межмерзлотных вод, объектом изучения выступают подмерзлотные природные рассолы. В пределах осадочного чехла в отметках отработки и прямого техногенного влияния от процесса откачки-закачки выделяют следующие водоносные комплексы [11, 17]:

1. Первый от поверхности подмерзлотный верхнекембрийский водоносный комплекс (ВВК) является наименее водообильным комплексом в пределах изучаемой территории. От дневной поверхности он отделен толщей (150–250 м) ММП олдонинской, онхойюряхской и моркокинской свит. Абсолютная отметка кровли составляет +99/+180 м. Подошвой комплекса служит нижняя часть разреза мархинской свиты, находящаяся на абсолютных отметках –180/–200 м. Общая

мощность водоносного комплекса достигает 300 м, эффективная мощность коллекторов редко превышает 50 м. Водовмещающими породами являются трещиноватые и кавернозные известняки и доломиты моркокинской и мархинской свит. Водоносный комплекс напорный. Напоры над кровлей в естественных условиях ~20–50 м. Коэффициент проводимости (Т) составляет от 0.001 до 0.3 (редко до 1.0) м²/сут. Минерализация рассолов до 300 г/л. Водоносный комплекс при полном дренировании формирует притоки к карьере рудника Удачный 10 м³/сут. В настоящее время водоносный комплекс в пределах карьерного поля существенно сдренирован, в момент вскрытия притоки достигали 1000 м³/сут. Приток из верхнекембрийского комплекса в карьер трубки Зарница будет составлять не более 50 м³/сут.

2. Второй от поверхности – среднекембрийский водоносный комплекс (СВК), состоящий из двух водоносных горизонтов СВГ-1 и СВГ-2. Абсолютная отметка кровли комплекса составляет –200/–240 м. Подошвой комплекса служит нижняя часть разреза удачининской свиты, находящаяся на абсолютных отметках –1000/–1050 м. Общая мощность СВК достигает 600–650 м, эффективная мощность коллекторов составляет 200–250 м. Водовмещающими породами являются трещиноватые и кавернозные известняки и доломиты нерасчлененной известняково-доломитовой толщи и удачининской свиты.

СВГ-1 приурочен к карбонатным отложениям известняково-доломитовой толщи максимальной мощностью около 480 м. Граница между нижним горизонтом ВВК и первым водоносным горизонтом СВК проходит по подошве первой пачки мархинской свиты. Подошвой горизонта служат плотные, практически водоупорные эпифитоновые и органогенно-обломочные известняки удачининской пачки нижнего и среднего кембрия.

СВГ-2 приурочен к удачининской свите, представленной рифовыми кавернозно-трещиноватыми известняками и доломитами (мощностью до 450–500 м). Кровлей горизонта служат глинистые пачки карбонатных пород. Подошвой являются плотные, практически водоупорные эпифитоновые и органогенно-обломочные известняки удачининской свиты.

Водоносный комплекс напорный. Напоры над кровлей в естественных условиях ~350–450 м. Коэффициент проводимости (Т) составляет от 2.5 до 40 (редко до 60.0) м²/сут. Минерализация рассолов до 400 г/л. Водоносный комплекс при полном дренировании будет формировать притоки к подземным горным выработкам рудника Удачный (радиусом 1000 м) 14000 м³/сут. В настоящее время водоносный комплекс в пределах шахтного поля существенно осушен только в ин-

тервале СВГ-1 (гор. –465 м), приуроченного известняково-доломитовой пачке, приток к подземным горным выработкам рудника составляет до 9000 м³/сут. Прогнозный приток из СВГ в карьер трубки Зарница будет составлять не более 600 м³/сут.

3. Третий от поверхности – нижнекембрийский водоносный комплекс (НВГ), приуроченный преимущественно к окремненным пористо-кавернозным доломитам кумахской свиты (Е₁ к) и водорослевым известнякам эмяксинской (Е₁ ем) свиты. Кровлей водоносного горизонта являются органогенно-обломочные известняки удачининской свиты, а подошвой – водорослевые известняки эмяксинской свиты. Абсолютная отметка кровли составляет –1050/–1100 м. Подошвой комплекса служит нижняя часть разреза эмяксинской свиты, находящаяся на абсолютных отметках –1400/–1450 м. Общая мощность НВГ достигает 300–350 м, эффективная мощность коллекторов 100–150 м. Водовмещающими породами являются трещиноватые и кавернозные известняки и доломиты кумахской и эмяксинской свит. Водоносный комплекс напорный. Напоры над кровлей в естественных условиях ~1000–1200 м. Коэффициент проводимости (Т) составляет от 15 до 100 (редко до 150–200) м²/сут. Минерализация рассолов до 420 г/л. Водоносный комплекс при полном дренировании будет формировать притоки к подземным горным выработкам рудника Удачный (радиусом 1000 м) 40000 м³/сут. В настоящее время водоносный комплекс не вскрыт. Планируемая дата вскрытия – конец 30-х годов XXI в.

Криогенное строение осадочных толщ и кимберлитов изучено в районе трубки Удачная при детальном описании керна скважин, пробуренных в долинах рек Далдын, Сытыкан и на водоразделах. В породах с ненарушенным залеганием до глубины 15–30 м выделяется наиболее льдонасыщенный горизонт. Породам свойственны трещинные и пластово-трещинные незакономерно-сетчатые полновыраженные криогенные текстуры. Объемная льдистость составляет 20–30%. На глубине свыше 25 м основной фон трещиноватости определяется наличием трещин напластования. Ледяные включения типичны для контактов пород различного литолого-петрографического состава, а именно глинистых и доломитизированных известняков, известняков и мергелей и т.п.

Плотные породы (известняки, доломиты) разбиты вертикальными и наклонными трещинами скола шириной 0.5–2.0 см. Также фиксируются интервалы пористых и кавернозных известняков. Диаметр каверн составляет 0.2–0.5 см, а иногда достигает 2.0 см. Мерзлые породы имеют трещинные, пластово-трещинные и пластово-трещинно-карстовые криогенные текстуры. Лед в

Таблица 1. Комплекс поисковых признаков (критериев) структур пригодных для закачки дренажных вод в ММП

Поисковый признак	Характеристика признака (критерия)
Тектонический	Региональные тектонические нарушения и оперяющая трещиноватость
Структурный	Отрицательные, неравномерно опущенные структуры в мерзлой толще верхнекембрийских отложений
Геофизический	Отрицательные гравитационные аномалии; линейные аномалии электрического сопротивления; локальные магнитные аномалии трубчатого и даечного типов
Газодинамические	Разнонаправленные движения воздуха в стволах скважин
Геоморфологический	Возвышенные площади и водораздельные участки с максимальной толщиной мерзлых пород
Гидрогеологические	Повышенные фильтрационно-емкостные показатели подмерзлотного горизонта
Температурные	Существование аномальных температурных зон внутри мерзлого яруса криолитосферы

трещинах чистый, прозрачный, иногда в его массе заключены пропластки мергелей и известняков. Объемная льдистость пород изменяется по разрезу от 20 до 5%. Влажность глинистых известняков составляет 6–14%. В ряде случаев скважинами вскрыты пачки монолитных крепких известняков и доломитов мощностью 2–5 м. Пленки льда визуально видны только на сколе образцов. Подошва ММП фиксируется на глубине 70–230 м. Влажность этих литологических разностей не превышает 1–2%.

Ниже по разрезу до кровли первого от поверхности водоносного комплекса прослеживается 40–60-метровая толща морозных горных пород без включений льда.

Криогенное строение осадочных пород в зонах тектонических нарушений изучено по керну скважин глубиной 150–260 м. Установлено, что зоны дробления осадочного чехла отличаются интенсивной трещиноватостью и связанной с ней льдистостью. Породы в них местами превращены в щебень и сцементированы льдом. В при-

поверхностных интервалах в этом случае отмечаются расширенные трещинные, трещинно-жильные и базальные криогенные текстуры. Ниже по разрезу осадочные толщи разбиты вертикальными и наклонными трещинами шириной от 0.5 до 12.0 см. В интервале глубин 30–180 м породы также отличаются значительной нарушенностью и льдистостью, значения которой составляют 10–35%. В интервале 180–200 м трещиноватость заметно уменьшается. Величина объемной льдистости составляет 5–10%, а ширина трещин не превышает 2 см. На глубине 200–220 м отмечены только каверны (0.5–1.0 см в диаметре), заполненные льдом. Ниже 220 м, как правило, отмечается монолитная морозная толща, в которой включения льда не фиксируются. Подошва этого слоя соответствует кровле первого от поверхности водоносного комплекса.

По результатам решения обратной задачи, для ММП выделены зоны повышенной проницаемости вдоль ряда эксплуатационных скважин, а также в проницаемых зонах (зон разломов) в северном, северо-восточном и юго-западном направлениях, расчетные коэффициенты фильтрации составляют в пределах от 0.03 до 2.6 м/сут. Для периферийных зон коэффициенты фильтрации достигают до 0.01 м/сут. Для придолинных участков и оснований склонов значения коэффициентов фильтрации составляют 0.001 м/сут.

МЕТОДИКА ВЫБОРА БЛАГОПРИЯТНЫХ СТРУКТУР ДЛЯ ЗАКАЧКИ ДРЕНАЖНЫХ РАССОЛОВ В ММП КРИОЛИТОЗОНЫ

Поиск и выбор участков, пригодных для закачки дренажных вод, обусловлены определенными затратами, непосредственно связанными со строительными-монтажными и эксплуатационными работами. При этом их объемы должны быть оптимальными. Поэтому разработке методов обнаружения перспективных подземных структур с использованием целенаправленного комплекса поисковых признаков придается особое значение.

Для выбора перспективных криогенных структур разработан и успешно применен на практике комплекс поисковых критериев, включающий: структурные, тектонические, геоморфологические, геофизические, газодинамические, температурные, гидрогеологические, геохимические признаки. Каждый критерий имеет свою физическую подоплеку, напрямую или косвенно связан с фильтрационно-емкостными свойствами криогеологической среды (табл. 1) [2–4, 7–10 и др.].

Выбору участков предшествуют комплекс изучения гидрогеологических условий и годы научно-методических исследований [5]. Гидрогеоло-

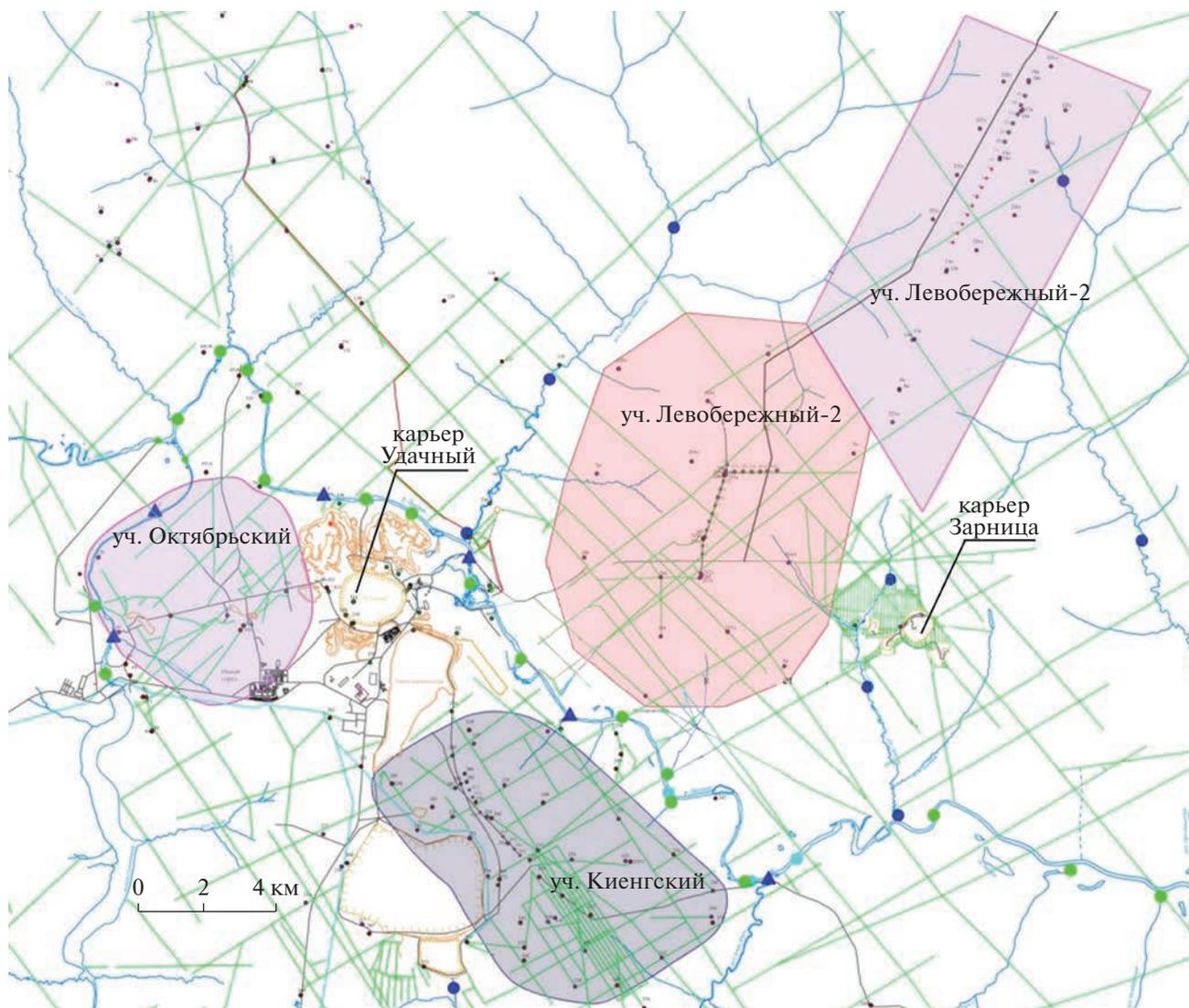


Рис. 1. Ситуационный план расположения существующих участков закачки в ММП Далдынского кимберлитового поля.

гические условия Далдынского кимберлитового поля, а именно наличие высокопроницаемых коллекторов, пригодных для обратной закачки на глубинах более 1200 м от дневной поверхности, предопределили на первоначальном этапе тип участков, используемых для возврата в недра дренажных рассолов. Исследования, проведенные коллективом ученых ИЗК СО РАН (под руководством С.В. Алексева и Л.П. Алексеевой), с последующей адаптацией применительно к участкам Октябрьский и Киенгский (А.В. Дроздов, В.В. Лобанов, Н.А. Иост и др.) позволили обосновать первоначальное использование толщи многолетнемерзлых пород для закачки высоко минеральных вод.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Экологическая надежность применяемого на участках способа закачки в ММП испытана уже в

течение более чем 35-летнего периода промышленной эксплуатации на Удачинском ГОКе [13]. Дренажные воды трубки Удачная в разные периоды отработки закачивались в участки Октябрьский (1985–2002 гг.), Киенгский (2003–2012 гг.), Левобережный (2012–2023 гг.) [4, 10]. В настоящее время эксплуатируется участок Левобережный-2 с оцененным объемом ~17 млн м³ (рис. 1). Всего за весь период эксплуатации во внутримерзлотные коллекторы криолитозоны по состоянию на 01.01.2023 г. закачано порядка 45 млн м³ дренажных рассолов.

В процессе использования данного метода утилизации рассолов производился эколого-геохимический мониторинг наземных экосистем. Рассмотрим природное состояние экосистем на примере Киенгского участка до начала (с 1993 по 2000 г.) а также в периоды эксплуатации за период с 2001 по 2013 г. и последующей “релаксации”

Таблица 2. Химический состав воды руч. Киенг-Юрях

Показатель	ПДК, мг/л	Фоновые содержания	Содержание в руч. Киенг-Юрях
Катионы			
Ca ²⁺	180	55.34	51.67
Mg ²⁺	40	25.96	42.36
Na ⁺	200	6.26	5.64
K ⁺	2	1.46	0.3
Анионы			
HCO ₃ ⁻	—	238.9	91.4
SO ₄ ²⁺	500	3.85	0.25
Cl ⁻	350	7.8	3.03
NO ₂ ⁻	3.3	0.058	0.04
Микроэлементы			
Be	0.2	<0.2	<0.2
J	1.0	<0.42	<0.42
F	1.5	<0.19	<0.19
Zn	1.0	0.012	0.012
Mn	0.1	0.03	0.011
Sr	7.0	0.216	0.073
Li	0.03	0.037	0.011
Pb	0.03	<0.03	0.03
Минерализация	1000	434	357

с 2014 по 2020 г. Участок расположен в центральной части Далдынского горнопромышленного узла, охватывает территорию водораздела рек Сытыкан и Далдын в пределах правобережных притоков последнего от руч. Новый до устья руч. Киенг-Юрях.

Необходимо отметить, что уже по итогам первого этапа мониторинговых работ, проведенных в 1994 г., содержания химических элементов в воде руч. Киенг-Юрях отличались от фоновых значений (табл. 2).

В период интенсивной эксплуатации участка 2000–2013 гг. минерализация воды в руч. Киенг-Юрях от дамбы маневровой емкости хвостохранилища до впадения в р. Далдын составляла 182–460 мг/л. Диапазон разброса контролируемых показателей зависел от многих факторов (сезона, климатических изменений и т.п.). Общее состояние природных вод ручья, учитывая значения основных показателей относительно уровня ПДК, можно признать удовлетворительным. Следует отметить и отсутствие выраженных аномалий элементов-токсикантов (Sr, Li, Zn, Pb). Последующие наблюдения с 2014 по 2020 г. не выявили резких изменений состава вод. Выполненный геоэкологический мониторинг показал, что каче-

ство воды на участках р. Далдын достигает нормативных параметров по многим показателям (рН, главные ионы солевого состава: кальций, магний, натрий, калий, хлориды, сульфаты). Кислородный режим водотоков удовлетворительный. На территории Удачинского ГОКа значительного влияния производственной деятельности на качество поверхностных водотоков не отмечено.

Закачка такого объема рассолов в толщи ММП привела к формированию межмерзлотных техногенных горизонтов, приуроченных к перечисленным участкам. Причем в результате растворения льдистой составляющей были сформированы вертикальные зоны массопереноса в низезалегающий подмерзлотный ВВК, дренируемый в настоящее время карьерами трубок Удачная и Зарница. Ввиду невысоких фильтрационных параметров, возврат закачиваемых вод к карьерным полям не происходит, наблюдается локальное изменение напоров в пределах прямого воздействия от участков закачки. Расход перетекания из техногенного водоносного горизонта в ВВК на участке Киенгский в зоне динамического влияния Октябрьского разлома составляет 490 м³/сут; а на участке Левобережный – 4570 м³/сут, что

обеспечивает образование зоны техногенного питания для частично сдренированного ВВК.

Залегающий ниже СВК в настоящее время формирует 99% дренажных вод рудника Удачный. В пределах СВК формируется обширная депрессионная воронка, не компенсированная процессом закачки всего объема дренажных вод в зону коллекторов ММП или НВК [15].

Альтернативой методу закачки в ММП являются очистка и складирование дренажных рассолов в гидротехнические сооружения (ГТС) и закачка в подмерзлотные коллекторы. Преимуществами выбранного метода являются: экологическая безопасность, относительно неглубокие закачные скважины, составляющие 250–280 м; главным недостатком – ограниченность объемов таких участков.

Для оценки потенциальной емкости участков закачки целесообразно ориентироваться на установленный на начальном этапе закачки характер развития депрессионной воронки в плане и разрезе [16, 17]. Радиус распространения рассолов в толще мерзлых пород также можно определить, исходя из решения задачи о радиальной фильтрации в сухой грунт. Контроль площадного распространения выполняется геофизическими методами (электротомография и др.).

Дополнительным методом контроля выступает гидрогеологическое моделирование. В разрезе вся толща пород разбивается на слои, причем слои могут быть горизонтальными или ограничиваться некоторой произвольной поверхностью, отражающей особенности строения водоносного горизонта. Полученная оценка потенциальной емкости участка закачки позволяет сделать вывод о возможности его экологически безопасной эксплуатации на период отработки месторождения.

Одним из способов увеличения емкости участков закачки является соляно-кислотная обработка, в результате которой происходит частичное растворение карбонатных пород и повышение их проницаемости. Однако существенно увеличить емкость этим методом не представляется возможным. Кроме того, частичное высвобождение емкости может происходить при формировании зон фильтрации в нижележащие подмерзлотные водоносные горизонты, что несет определенные экологические риски и требует дополнительного внимания при выполнении опытно-фильтрационных работ.

Механизм миграции рассолов в ММП может быть представлен следующей схемой. Рассолы, поступающие в ММП, имеют высокую минерализацию. Первоначально они заполняют свободную ото льда емкость трещинно-порового пространства. В этот период подаваемые в ММП рассолы продвигаются в массиве преимущественно по ослабленным зонам (зоны повышенной тре-

щинноватости, дробления с неполным заполнением льдом), которые вскрываются поглощающей (закачной) скважиной. Фильтрующиеся рассолы, обладая агрессивностью по отношению к ледовому заполнителю за счет высокой минерализации, выщелачивают лед из трещин и пор, что приводит к увеличению открытой трещинноватости и проницаемости массива. По мере увеличения плановых размеров ореола рассолов возрастает роль их вертикального проникновения через освобождающиеся ото льда трещины и ослабленные зоны в относительно водоупорных разделяющих слоях. Распространение рассолов в ММП связано с уменьшением их минерализации за счет разбавления растаявшим льдом и диффузионного отвода солей в блоки. Это снижает агрессивность рассолов ко льду, что в наибольшей мере проявляется на периферийных участках ореола растекания рассолов. Вследствие повышения температуры замерзания в краевых частях ореола растекания образуются центры кристаллизации льда, рассолы начинают смерзаться, и их плановое перемещение постепенно затухает. За счет гравитационной дифференциации подаваемые в ММП рассолы начинают практически полностью уходить через относительные водоупоры в залегающие ниже проницаемые слои. После прекращения подачи рассолов происходит снижение минерализации до значений 50–80 г/л (равновесная величина минерализации с температурой массива ММП, при которой рассолы замерзают при данной температуре), после чего рассолы замерзают и консервируются внутри массива ММП [2–4].

Минерализация рассолов трубки Удачная порядка 300–380 г/л, температура ММП на глубине 250–300 м составляет $-4 - -2^{\circ}\text{C}$. Минерализация рассолов, при которой раствор будет находиться в жидком состоянии, должна быть больше 50 г/л. Таким образом, 1 м³ рассола с минерализацией 300–380 г/л при температуре -3°C может растопить около 5 м³ льда.

Ограничений в закачке по нижней границе принципиально не существует, граница определяется залеганием эффективных приемистых интервалов разреза. Перетоки из зоны ММП в интервал ВВК являются дополнительной и существенной гарантией экологической безопасности технологии закачки дренажных вод в зону ММП, так как существенно снижают темп заполнения емкости ММП, положительно влияя на динамику уровня в этом интервале закачки дренажных вод. По физико-химическим характеристикам подземные и дренажные воды и горные породы совместимы.

По экологическим показателям такие участки безопасны, так как ореол растекания дренажных вод в пласте сравнительно невелик, значительная



Рис. 2. Коллекторы криогенной толщи (доломиты E_3 тг), формирующиеся в результате плавления жильных льдов.

величина подъема уровней характерна непосредственно только для зоны закачных скважин, а в рельефе не имеется значительно врезанных поверхностных водотоков и водоемов. Дополнительным положительным фактором выступает формирование упомянутых ранее зон перетока в нижележащий ВВК. Интервалы формирования коллекторов (рис. 2), как правило, приурочены к карбонатным разностям моркокинской (E_3 тгк) и мархинской (E_3 тг) свитам, т.е. располагаются на глубинах 150–280 м от дневной поверхности.

Верхним пределом интервала закачки дренажных вод в такие участки является положение гидрографической сети, т.е. положение уровней техногенного горизонта поддерживается на экологически безопасной глубине от дневной поверхности. Процесс контролируется режимом закачки (количеством закачных скважин, объемами закачки, безнапорным режимом закачки), а также режимными наблюдениями по сети наблюдательных скважин и по профилям наземной геофизической сети. Толща нетрещиноватых без льдистых пород ММП верхней части разреза служит региональным водоупором.

Первым участком, на котором был использован данный метод, стал *участок Октябрьский*, эксплуатация которого производилась в период 1985–2002 г. Всего с 1985 по 2002 г. на нем было закачено 10639.4 тыс. м³ дренажных вод, из которых 733.9 тыс. м³ – во временный накопитель, 9905.5 тыс. м³ – в скважины. При этом под закачку в разные годы использовалось 29 эксплуатационных скважин. Период эксплуатации одной скважины с средним составляет 3–5 лет с объемом закачки 300 тыс. м³. В результате закачки в толще ММП сформировалась техногенная зона, образо-

ванная закачиваемыми дренажными рассолами. Общая площадь участка закачки составляет ~45 км². В настоящее время полезная емкость участка исчерпана, закачные скважины ликвидированы, ведутся режимные наблюдения за сформированным в пределах участка техногенным горизонтом (криопэггом).

Участок Киенгский расположен на водоразделе рек Сытыкан и Далдын, вблизи руч. Правый Киенг, в 8 км на ЮВ от трубки Удачная. Участок Киенгский включает 65 скважин: 8 закачных, 57 наблюдательных. Закачка дренажных вод на участке в толщу ММП осуществлялась в период 2001–2013 гг. Суммарный объем закаченных вод 12.9 млн м³. С 2013 по 2021 г. закачка на участке не производилась. Результатом эксплуатации участка стало существенное увеличение фильтрационных параметров (в 3–5 раз), характеризующих массив ММП. Анализ полученных значений говорит о том, что в этом случае объект исследований правильнее рассматривать как техногенный водоносный горизонт, в котором уже сформирован упругий режим фильтрации, характерный для субнапорных водоносных горизонтов и комплексов. Наличие данных блоков легко объясняется не только литолого-фациальными особенностями пород, но и структурно-тектоническими факторами.

В геологическом строении мерзлого яруса в пределах участка Киенгский принимают участие карбонатные породы кембрия и ордовика, которые прорываются многочисленными секущими телами кимберлитовой (D_3-C_1) и трапповой (P_2-T_1) формаций (рис. 3). Интрузивные образования представлены кимберлитовыми трубками и жи-

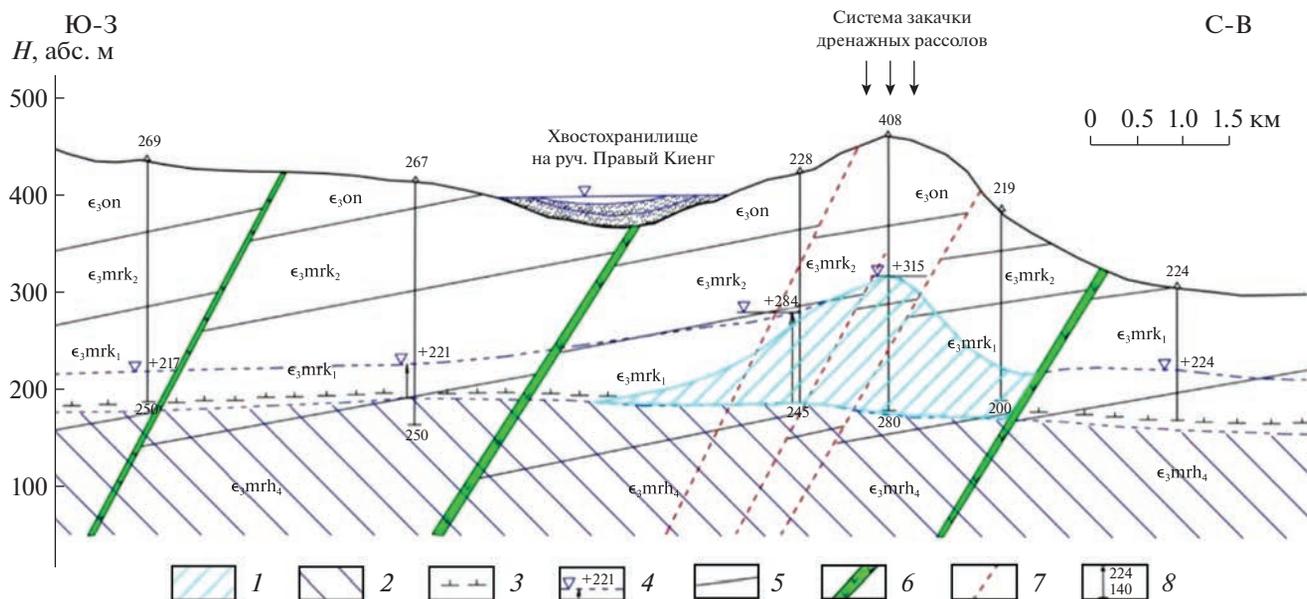


Рис. 3. Схематический криогидрогеологический разрез через Киенгский участок закачки. 1 – зона распространения техногенного водоносного горизонта в толще ММП; 2 – подмерзлотный водоносный горизонт; 3 – подошва ММП; 4 – пьезометрический уровень подмерзлотного горизонта, стрелка – напор, цифра – абсолютная отметка, м; 5 – стратиграфические границы свит; 6 – дайки долеритов; 7 – предполагаемые тектонические нарушения; 8 – гидрогеологическая скважина: вверху – ее номер, внизу – глубина, м.

лами, а базитовые – штокообразными интрузиями и дайками.

Структурно-тектоническое строение верхней части участка закачки сложное. В мерзлом ярусе центральной части полигона на уровне верхнекембрийских и ордовикских отложений наблюдаются несколько крупных неравномерно опущенных блоков пород. Границы объекта проходят: на севере, северо-востоке – по линии Октябрьского разлома; на юго-западе – по крайнему западному нарушению Вилойско-Котуйской зоны, заполненной трапповыми интрузиями.

По данным геофизических исследований в пределах участка выделено несколько тектонически активных зон, которые нашли отражение в свойственных им системах разрывных нарушений яруса мерзлых пород. Это предопределило существующую повышенную трещиноватость и льдистость пород, а также емкость формируемого резервуара в ММП и, следовательно, перспективность использования криогенного массива для закачки дренажных рассолов. В разрезе осадочной толщи преобладают доломиты (50–60%), известняки (30–40%), присутствуют мергели (5.0–10%). Основная поглощающая толща на участке залегает в интервале глубин 214–273 м.

Участок Левобережный расположен на левом берегу р. Далдын, вблизи ручья Улахан-Бысытта-ах, в 10 км на СВ от трубки Удачная и включает 45 скважин: 18 закачных, 27 наблюдательных. В геолого-стратиграфическом разрезе участка при-

нимают участие карбонатно-терригенные отложения мархинской, моркокинской и онхойряхской свит верхнего кембрия. На участке Левобережный отложения верхнего кембрия вскрыты всеми скважинами, они хорошо коррелируются с опорным геофизическим разрезом для Далдыно-Алаkitского кимберлитового поля и представлены отложениями верхней пачки мархинской свиты (ϵ_3 mrh₄), объединенной в геолого-геофизические пласты 24–25, нижней (пласты 22–23), верхней пачками (пласт 21) моркокинской свиты и нижней пачкой онхойряхской свиты (пласт 20). Установлено, что:

- на участке Левобережный ММП, имеющие включения видимого льда, заполняющего поры, каверны, трещины, и слагающие верхний ярус криолитозоны, имеют мощность 260–300 м. Ниже располагается ярус охлажденных пород, содержащих рассолы с отрицательной температурой (криопэги);

- подземные воды верхнекембрийского водоносного комплекса вскрываются на глубинах от 260 до 299.5 м. Воды слабонапорные, напоры составляют от 12.9 до 29.8 м;

- по результатам опытных наливов поглощающие коллекторы располагаются в интервале 180.0–295.0 м.

Эксплуатация участка в опытно-промышленном режиме началась в 2013 г. Всего с 2013 по 2022 г. на участке Левобережный закачано ~21 млн м³ дренажных вод, характеризующихся как хлоридно-

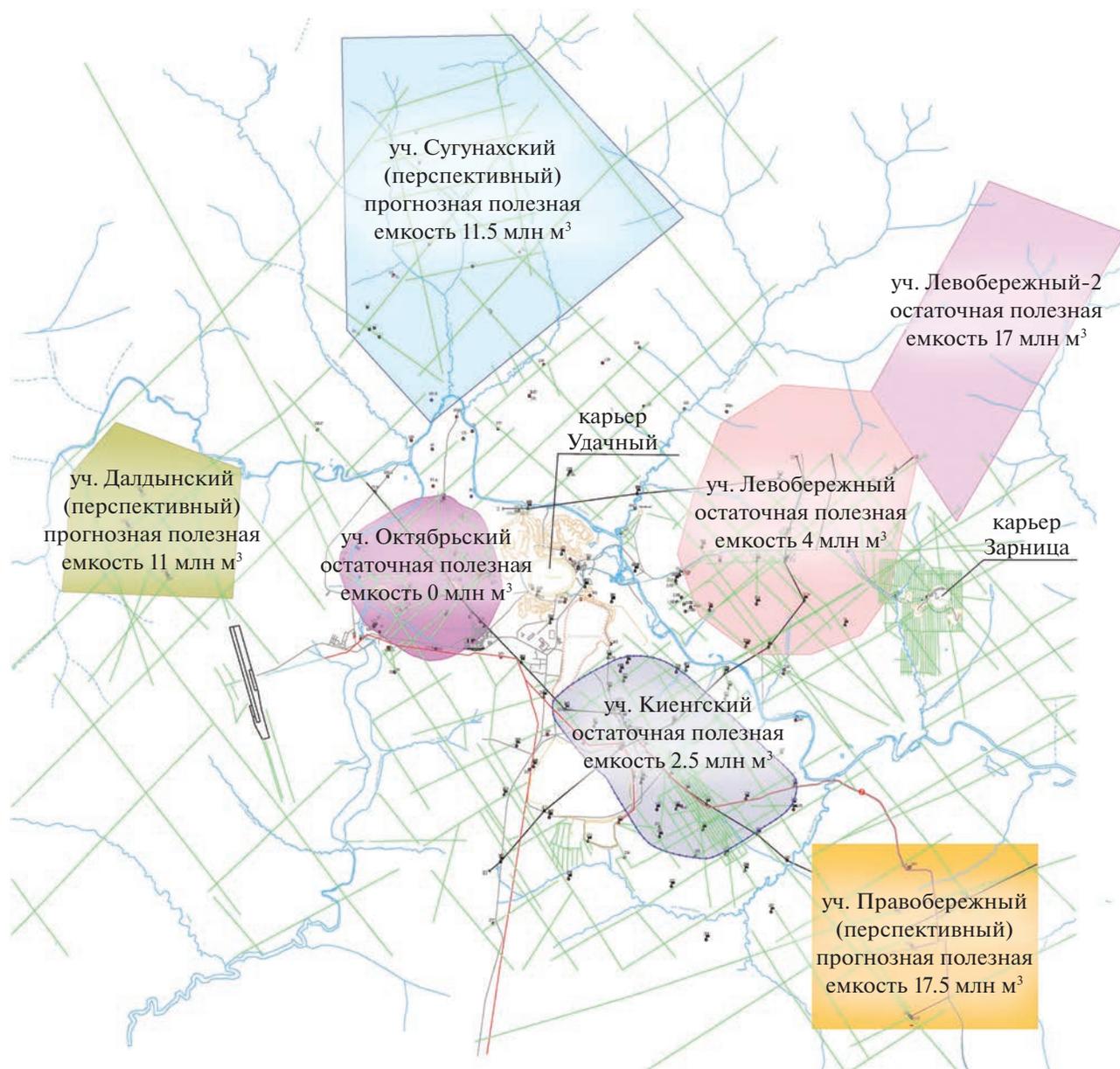


Рис. 4. Ситуационный план расположения существующих участков закачки и перспективных площадей Далдынского кимберлитового поля.

кальциевые рассолы с минерализацией от 250 до 350 г/л.

Результатом эксплуатации участка Левобережный стало существенное увеличение фильтрационных параметров (в 5 раз) массива ММП. Полученные результаты расчета коэффициентов водопроводимости и приемистости однозначно позволяют говорить о том, что максимальными параметрами характеризуется центральная и восточная части участка. Это делает обоснованным эксплуатацию участка с преобладающей закачкой дренажных вод в восточный ряд (№ 13з–18з) закачных скважин. Что обусловлено не только

полученными расчетными параметрами, но и плановым расположением данных скважин (на максимальном удалении от существующих поверхностных водотоков).

На основании анализа результатов поиска структур для закачки дренажных вод рудника Удачный и по результатам проведенных опытно-фильтрационных работ, для опытной эксплуатации был выбран **участок Левобережный-2**. Выбор данного участка обусловлен наиболее благоприятными фильтрационными, структурно-тектоническими и криогидрогеологическими характеристиками. В геолого-стратиграфическом разре-

зе изучаемой толщи ММП участка принимают участие нижнепалеозойские осадочные образования: карбонатно-терригенные отложения кембрийской системы: онхойюряхской ($E_3 on$), моркокинской ($E_3 mrg$) и мархинской ($E_3 mr$) свит. Поглощающие интервалы представлены трещиноватыми и кавернозно-трещиноватыми карбонатными породами моркокинской ($E_3 mrg$) и мархинской ($E_3 mr$) свит. Наиболее проницаемые пласты-коллекторы, по результатам расходомерии, отмечены в интервалах глубин 157.0–190.0 м и 206.0–266.0 м. По причине незначительного объема закачанных вод ~100 тыс. м³, формирования техногенного водоносного горизонта и зон вертикального массопереноса в ВВК в пределах участка не произошло.

На основе анализа имеющейся информации по криогидрогеологическому, литолого-фациальному и структурно-геологическому строению изучаемой территории и с учетом выделенных поисковых признаков была составлена прогнозная карта участков, перспективных для геологического изучения и дальнейшей опытной эксплуатации, с оценкой полезных объемов как существующих, так и предлагаемых участков (рис. 4).

На территории исследования выделены участки: *Далдынский* (прогнозная полезная емкость 11 млн м³), *Правобережный* (прогнозная полезная емкость 17.5 млн м³) и *Сугунахский* (прогнозная полезная емкость 11.5 млн м³).

Участок Далдынский расположен западнее участка Октябрьский на расстоянии, исключаящем взаимное гидравлическое влияние, приурочен к зоне Октябрьского разлома, который подтвержден как рассолопоглощающая структура на участках Октябрьский и Киенгский. По геофизическим, структурным, газодинамическим, гидрогеологическим и температурным критериям выбранный участок является аналогом участка Октябрьский. По геоморфологическому критерию территория располагается на водоразделе без врезанных водотоков в центральной части.

Участок Правобережный по всем выделенным критериям является аналогом участка Киенгский. Он так же приурочен к зоне Октябрьского разлома, который проходит через его осевую часть.

Участок Сугунахский приурочен к зоне более мелких региональных и кимберлитконтролирующих разломов. Его отличительная особенность — приуроченность в осевой части к Сугунахской кольцевой тектонической структуре сбросового типа, что предопределяет увеличение мощности многолетней мерзлоты до 500–600 м и, как следствие, полезной емкости участка.

ВЫВОДЫ

Разработка алмазных месторождений Далдынского кимберлитового поля в условиях Крайнего Севера приводит к существенному преобразованию окружающей природной обстановки. Для безопасной утилизации дренажных рассолов, образующихся в процессе работы Удачинского ГОКа, используется метод закачки в ММП. Выполненные исследования и последующие расчеты позволяют рассматривать коллекторы толщи ММП как целевой объект для дальнейшего расширения системы закачки дренажных вод рудника Удачный и карьера Зарница.

Наиболее перспективными являются участки Далдынский, Правобережный и Сугунахский. При прогнозируемых притоках дренажных вод ввод в эксплуатацию рассматриваемых участков позволит дополнительно закачать ~40 млн м³, что обеспечит дальнейшую экологически безопасную отработку месторождений Далдынского кимберлитового поля, как минимум до середины 30-х годов XXI в.

В качестве основной рекомендации, предлагаемой к реализации, является проведение дальнейших исследований в рамках Далдынского кимберлитового поля для подтверждения перспективности участков закачки, определенных в данной работе. Выделенные критерии поисков новых участков будут учитываться при будущем строительстве в рамках расширения существующей системы закачки дренажных вод рудника Удачный, что необходимо для предотвращения негативного техногенного воздействия на геологическую и окружающую среды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Агринский А.В.* Результаты изучения гидрогеологических условий при разведке одной из кимберлитовых трубок в Западной Якутии // Тр. ВСЕГИНГЕО. 1980. № 135. С. 48–57.
2. *Алексеев С.В., Алексеева Л.П.* Итоги и перспективы захоронения дренажных вод кимберлитовой трубки Удачная в мерзлых породах // Итоги геокриологических исследований в Якутии в XX веке и перспективы их дальнейшего развития. Якутск: Изд-во ИМЗ СО РАН, 2003 С. 67–78.
3. *Алексеев С.В., Алексеева Л.П., Гладков А.С., Трифонов Н.С. и др.* Рассолы глубоких горизонтов кимберлитовой трубки Удачная // Геодинамика и тектонофизика. 2018. Т. 9. № 4. С. 1235–1253. <https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-4-0393>
4. *Алексеев С.В., Дроздов А.В., Дроздова Т.И., Алексеева Л.П.* Первый опыт захоронения соленых дренажных вод карьера трубки Удачная в многолетнемерзлые породы // Криосфера Земли. 2002. Т. VI. № 2. С. 61–65.
5. *Гавич И.К.* Основы гидрогеологической стратификации и обработки информации. М.: МГРИ, 1982. 79 с.

6. Гидрогеология СССР. Том XX. Якутская АССР. М.: Недра, 1970. 384 с.
7. Гидрогеологические исследования для обоснования подземного захоронения промышленных стоков / Под ред. В.А. Грабовникова. М.: Недра, 1993. 335 с.
8. Дроздов А.В. Захоронение дренажных рассолов в многолетнемерзлых породах (на примере криолитозоны Сибирской платформы). Иркутск: Изд-во ИГТУ, 2007. 296 с.
9. Дроздов А.В. Оценка перспективности участка “Левобережный” для захоронения дренажных рассолов трубки “Удачной” // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле РАЕН. 2013. № 1 (42). С. 146–56.
10. Дроздов А.В. Подземное захоронение дренажных рассолов в многолетнемерзлые породы (на примере Удачинского ГОКа в Западной Якутии) // Геоэкология. 2005. № 3. С. 234–243.
11. Дроздов А.В., Иост Н.А., Лобанов В.В. Криогидрогеология алмазных месторождений Западной Якутии. Иркутск: Изд-во ИГТУ, 2008. 507 с.
12. Климовский И.В., Готовцев С.П. Криолитозона Якутской алмазоносной провинции. Новосибирск: Наука, 1994. 167 с.
13. Климовский И.В., Готовцев С.П., Шенелев В.В. Гидрогеокриологические условия полигона подземного захоронения дренажных вод трубки “Удачная” // Криосфера Земли. 2002. Т. VI. № 3. С. 45–50.
14. Колганов В.Ф., Акишев А.Н., Дроздов А.В. Горногеологические особенности коренных месторождений алмазов Якутии. Мирный: Мирнинская типография, 2013. 568 с.
15. Янников А.М. Гидрогеология Мирнинского кимберлитового поля. Мирный: Изд-во ЗЯНЦ/ЯНА, 2021. 240 с.
16. Янников А.М., Зырянов И.В., Корепанов А.Ю., Стручкова А.С. Динамика и прогноз изменения гидродинамического режима нижнекембрийского водоносного комплекса в пределах Далдынской флексуры // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2022. № 9. С. 60–73.
https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_9_0_60
17. Янников А.М., Янникова С.А., Овчинникова М.Ю., Корепанов А.Ю. Использование многолетнемерзлых пород для закачки дренажных вод коренных месторождений алмазов на примере участка “Ноябрьский” (рудник “Айхал”) // Вестник Пермского университета. Геология. 2021. Т. 20. № 3. С. 284–299.
<https://doi.org/10.17072/psu.geol.20.3.284>

PROSPECTS FOR THE USE OF PERMAFROST AT THE DALDYNSKOE KIBERLITE FIELD FOR INJECTION OF DRAINAGE WATER FROM ZARNITSA AND UDACHNAYA DIAMOND PIPES

A. M. Yannikov^{a,#}

^a*Yakutniproalmaz Institute, ALROSA Joint-Stock Co.,
ul. Lenina, 39, Mirny, Republic of Sakha (Yakutia), 678174 Russia*

[#]*E-mail: yannikov90@mail.ru*

Environmentally friendly disposal of drainage water arising from the development of diamond tubes is currently becoming very acute for reducing technogenic load on the environment and for introducing new methods and technical solutions. Drainage water from the Daldynskoe kimberlite field were pumped into the Oktiabrsky (1985–2002), Kiengsky (2003–2012), and Levoberezhny (2012–2023) sites at different periods of the deposit development. Currently, Levoberezhny-2 site is being used, which has partially exhausted its useful capacity. As a result, the task was set to determine the possibilities for the further use of permafrost reservoirs in the study area, to identify and evaluate the most promising areas for future injection. The objects of study include the Upper Cambrian strata in the permafrost bottom, below the main erosion bases in the study area. A set of search features (criteria) of structures suitable for pumping drainage water into permafrost has been identified. These are tectonic, structural, geophysical, gas-dynamic, geomorphological, hydrogeological, temperature criteria. Taking into account the analysis of the available information on cryohydrogeological, lithofacial and structural-geological structure of the study area, a forecast map of areas that are promising for geological study and further trial operation was compiled, with an assessment of their useful volumes. The most promising areas are Daldynsky, Pravoberezhny and Sugunakhsky sites. The preliminary estimated useful volumes of these areas, in the case of the use of already developed technologies, are: Daldynsky ~11 million m³; Pravoberezhny ~17.5 million m³; and Sugunakhsky ~11.5 million m³. In other words, with projected drainage water inflow, the considered areas will allow additional pumping of ~40 million m³, which will ensure further environmentally safe mining of the Daldynskoe kimberlite field at least until the mid-2030s. The suggested method of pumping drainage water can be used in related industrial fields for mining not only kimberlite pipes, but also other solid minerals in the permafrost zone.

Keywords: *Daldynskoe kimberlite field, Zarnitsa pipe, Udachnaya pipe, natural brines, injection sites*

REFERENCES

1. Agrinskii, A.V. *Rezultaty izucheniya gidrogeologicheskikh uslovii pri razvedke odnoi iz kimberlitovykh trubok v Zapadnoi Yakutii* [Results of the study of hydrogeological conditions during the exploration of a kimberlite pipe in Western Yakutia]. Proc. VSEGINGEO, 1980, no. 135, pp. 48–57. (in Russian)
2. Alekseev, S.V., Alekseeva, L.P. *Itogi i perspektivy zakhroneniya drenazhnykh vod kimberlitovoi trubki Udachnaya v merzlykh porodakh* [Results and prospects for the burial of drainage water of the Udachnaya kimberlite pipe in frozen rocks]. *Itogi geokriologicheskikh issledovaniy v Yakutii v XX veke i perspektivy ikh dal'neishego razvitiya* [Results of the geocryological studies in Yakutia in the 20th century and the prospects for future development]. Yakutsk, IMZ SO RAN Publ., 2003, pp. 67–78. (in Russian)
3. Alekseev, S.V., Alekseeva, L.P., Gladkov, A.S., Trifonov, N.S., et al. *Rassoly glubokikh gorizontov kimberlitovoi trubki Udachnaya* [Brines in deep horizons of the Udachnaya kimberlite pipe]. *Geodinamika i tektonofizika*, 2018, vol. 9, no. 4, pp. 1235–1253. (in Russian)
4. Alekseev, S.V., Drozdov, A.V., Drozdova, T.I., Alekseeva, L.P. *Pervyi opyt zakhroneniya solenyykh drenazhnykh vod kar'era trubki Udachnaya v mnogoletnemerzlye porody* [The first experience in burial of saline drainage water from the Udachnaya pipe quarry to the permafrost]. *Kriosfera Zemli*, 2002, vol. VI, no. 2, pp. 61–65. (in Russian)
5. Gavich, I.K. *Osnovy gidrogeologicheskoi stratifikatsii i obrabotki informatsii* [Fundamentals of hydrogeological stratification and information processing]. Moscow, MGRI Publ., 1982, 79 p. (in Russian)
6. *Gidrogeologiya SSSR. Tom XX. Yakutskaya ASSR* [Hydrogeology of the USSR. Volume XX. Yakut ASSR]. Moscow, Nedra Publ., 1970, 384 p. (in Russian)
7. *Gidrogeologicheskie issledovaniya dlya obosnovaniya podzemnogo zakhroneniya promyshlennykh stokov* [Hydrogeological studies to justify the underground disposal of industrial wastewater]. V.A. Grabovnikova, Ed., Moscow, Nedra Publ., 1993, 335 p. (in Russian)
8. Drozdov, A.V. *Zakhronenie drenazhnykh rassolov v mnogoletnemerzlykh porodakh (na primere kriolitozony Sibirskoi platformy)* [Burial of drainage brines in permafrost (by the example of the permafrost zone in the Siberian Platform)]. Irkutsk, IGTU Publ., 2007, 296 p. (in Russian)
9. Drozdov, A.V. *Otsenka perspektivnosti uchastka "Levoberezhnyi" dlya zakhroneniya drenazhnykh rassolov trubki "Udachnoi"* [Assessment of the prospects of Levoberezhny site for the disposal of drainage brines from the Udachnaya pipe]. *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya Sektzii nauk o Zemle RAEN*, 2013, no. 1 (42), pp. 146–156. (in Russian)
10. Drozdov, A.V. *Podzemnoe zakhronenie drenazhnykh rassolov v mnogoletnemerzlye porody (na primere Udachninskogo GOKa v Zapadnoi Yakutii)* [Underground burial of drainage brines in permafrost (by the example of the Udachninsky GOK in Western Yakutia)]. *Geoekologiya*, 2005, no. 3, pp. 234–243. (in Russian)
11. Drozdov, A.V., Iost, N.A., Lobanov, V.V. *Kriogidrogeologiyaalmaznykh mestorozhdenii Zapadnoi Yakutii* [Cryohydrogeology of diamond deposits in Western Yakutia]. Irkutsk, IGTU Publ., 2008, 507 p. (in Russian)
12. Klimovskii, I.V., Gotovtsev, S.P. *Kriolitozona Yakutskoi amazonosnoi provintsii* [Cryolithozone of the Yakutsk diamondiferous province]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1994, 167 p. (in Russian)
13. Klimovskii, I.V., Gotovtsev, S.P., Shepelev, V.V. *Gidrogeokriologicheskie usloviya poligona podzemnogo zakhroneniya drenazhnykh vod trubki "Udachnaya"* [Hydrogeocryological conditions at the disposal site for underground burial of drainage water from the "Udachnaya" pipe]. *Kriosfera Zemli*, 2002, vol. VI, no. 3, pp. 45–50. (in Russian)
14. Kolganov, V.F., Akishev, A.N., Drozdov, A.V. *Gornogeologicheskie osobennosti korennykh mestorozhdeniialmazov Yakutii* [Mining and geological features of primary diamond deposits in Yakutia]. Mirnyi, Mirninskaya tipografiya, 2013, 568 p. (in Russian)
15. Yannikov, A.M. *Gidrogeologiya Mirninskogo kimberlitovogo polya* [Hydrogeology of the Mirny kimberlite field]. Mirnyi, ZYANTs/YaNA Publ., 2021, 240 p. (in Russian)
16. Yannikov, A.M., Zyryanov, I.V., Korepanov, A.Yu., Struchkova, A.S. *Dinamika i prognoz izmeneniya gidrodinamicheskogo rezhima nizhněkembriiskogo vodonosnogo kompleksa v predelakh Daldynskoi fleksury* [Dynamics and forecast of changes in the hydrodynamic regime of the Lower Cambrian aquifer within the Daldynskaya flexure]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal)*, 2022, no. 9, pp. 60–73. (in Russian)
17. Yannikov, A.M., Yannikova, S.A., Ovchinnikova, M.Yu., Korepanov, A.Yu. *Ispol'zovanie mnogoletnemerzlykh porod dlya zakachki drenazhnykh vod korennykh mestorozhdeniialmazov na primere uchastka "Noyabr'skii" (rudnik "Aikhal")* [The use of permafrost rocks for injection of drainage water of primary diamond deposits by the example of Noyabrsky site (Aikhal mine)]. *Vestnik Permskogo universiteta. Geologiya*, 2021, vol. 20, no. 3, pp. 284–299. <https://doi.org/10.17072/psu.geol.20.3.284>. (in Russian)

УДК 551.4.012

ОЦЕНКА ЭВОЛЮЦИИ МОРФОЛОГИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ТЕРМОКАРСТОВЫХ РАВНИН КРИОЛИТОЗОНЫ В СВЯЗИ С КЛИМАТИЧЕСКИМИ ИЗМЕНЕНИЯМИ ПО МАТЕРИАЛАМ КОСМИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ

© 2023 г. А. С. Викторов^{1,*}, М. В. Архипова¹, В. Н. Капралова¹,
Т. В. Орлов¹, О. Н. Трапезникова¹

¹Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева Российской академии наук
Уланский переулок, 13, стр. 2, Москва, 101000 Россия

*E-mail: vic_as@mail.ru

Поступила в редакцию 11.07.2022 г.

После доработки 04.11.2022 г.

Принята к публикации 21.11.2022 г.

Вопрос изменения геокриологических условий и ландшафта криолитозоны в связи с климатическими изменениями в настоящее время является актуальным и активно изучается многими исследователями. Однако при этом изменению морфологической структуры и количественному анализу уделяется недостаточно внимания. Цель настоящего исследования – количественный анализ морфологической структуры эрозионно-термокарстовой и озерно-термокарстовой равнины. Исследование проведено по материалам космической съемки: архивные снимки Согопа с разрешением 3–12 м/пикс, за 1961–1979 гг. и набор современных снимков высокого разрешения 0.5–2.5 м/пикс за 2008–2019 гг. Анализ изменений морфологической структуры термокарстовых равнин проводился по ключевым участкам, расположенным в зоне сплошной многолетней мерзлоты, на севере Западно-Сибирской низменности, в устье р. Лена, в Восточной Сибири, на Баффиновой Земле. Проверка статистических различий между выборками 1961–1979 и 2013–2019 гг. по критерию Смирнова выявила статистически значимые различия в распределениях площадей озер эрозионно-термокарстовых равнин только на двух участках. На одном из этих участков изменения носят плавный характер с сохранением интегрально-экспоненциального вида распределения площадей озер. Оценка значимости статистических различий за 1964–1976 и 2008–2014 гг. для озерно-термокарстовых равнин выявила значимое различие только для одного участка. Изменение морфологической структуры эрозионно-термокарстовых равнин в связи с климатическими изменениями протекает более интенсивно, чем у озерно-термокарстовых равнин; изменения затронули 22% ключевых участков против 12% у озерно-термокарстовых равнин. Ключевые участки с выявленными изменениями относятся к полуострову Ямал. Устойчивость морфологических структур к климатическим изменениям выше, чем у отдельных компонентов ландшафта. На климатические изменения в первую очередь реагируют эрозионные процессы, что приводит к изменению распределений площадей термокарстовых озер эрозионно-термокарстовых равнин при интенсификации их спуска и превращения в хасыреи.

Ключевые слова: криолитозона, термокарст, математическая модель, морфологическая структура, космическая съемка

DOI: 10.31857/S0869780923020091, EDN: TWPUOG

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время изучаются различные аспекты изменений геокриологических условий криолитозоны и ее ландшафтов в связи с климатическими изменениями [8, 9, 12, и др.]. Однако изменение морфологической структуры ландшафтов криолитозоны рассматривалось в сравнительно небольшом числе работ, как правило, эти исследования касались изменения заозеренности ландшафтов, включая инвентаризацию ко-

личества и площадей озер, и иногда их динамики [5–7, 13]. Авторами работ [10, 11] сделана не вполне удачная попытка подобрать функцию, описывающую распределения площадей озер. Современные средства обработки космической съемки позволяют работать с большими площадями, чему посвящено большое количество исследований [13–15]. Однако очень малое количество исследований посвящено изменению количественных характеристик морфологической структуры

ландшафтов криолитозоны. Крайне редко исследователи предлагали модели, описывающие поведение количественных характеристик морфологических структур.

Цель настоящего исследования — количественный анализ изменения морфологической структуры одного из наиболее распространенных типов ландшафтов криолитозоны — термокарстовых равнин.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследование охватило два вида наиболее распространенных ландшафтов термокарстовых равнин:

- озерно-термокарстовые равнины,
- эрозионно-термокарстовые равнины.

Методика изучения изменения морфологической структуры изучаемых ландшафтов включала следующие этапы:

– выбор параметров для сравнения морфологической структуры изучаемых ландшафтов в различное время на основе соответствующей модели;

– выбор эталонных участков по данным дистанционного зондирования, литературным и иным источникам и выделение термокарстовых озер как наиболее мобильных элементов морфологической структуры исследуемых ландшафтов в пределах ключевых участков;

– сравнение эмпирических распределений площадей термокарстовых озер за два срока для каждого участка на основе статистического критерия Смирнова;

– сравнение значений параметров морфологических структур ландшафта каждого участка за разные сроки;

- анализ выявленных тенденций.

Выбор участков осуществлялся по материалам космической съемки, литературным и картографическим данным. Главным требованием являлась генетическая, ландшафтная и морфологическая однородность, его соблюдения достигалось путем анализа снимков и дополнительных источников информации. Подбор материалов дистанционных съемок эталонных участков озерно-термокарстовых равнин и эрозионно-термокарстовых равнин осуществлялся с учетом необходимости обеспечения двух сроков съемки каждого участка, обеспечения возможно большего интервала между съемками, максимизации пространственного разрешения материалов дистанционных съемок.

При исследовании использовались следующие материалы космической съемки:

- архивные снимки Corona с разрешением 3–12 м/пикс, даты съемки — июнь–август 1965–1976 гг.;

– современные снимки со спутников IKONOS, QuickBird, Worldview 2, Geoeye-1, Pleiadas, SPOT-5, SPOT-6 высокого разрешения 0.5–2.5 м/пикс, полученные как из открытых источников (Google earth, yandex maps, Bing), так и специально приобретенные (ИТЦ СКАНЭКС).

В итоге был сформирован комплекс материалов аэро- и космических съемок для решения поставленных задач. Более детальные характеристики используемых съемок приведены в табл. 1.

Выделение термокарстовых озер и определение их площади производилось на базе геоинформационной системы ARCGIS как автоматизированным методом, так и в ручном режиме. При этом использовались известные дешифровочные признаки термокарстовых озер [4].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Озерно-термокарстовые равнины представляют собой поверхность с пологоволнистым или пологохолмистым рельефом с развитием тундровой или лесотундровой растительности с вкраплениями термокарстовых озер. Термокарстовые озера часто имеют округлые формы и в беспорядке разбросаны по территории (рис. 1а,б). Иногда из-за слияния встречаются озера формы восьмиугольника или фестончатой формы.

В выполненных ранее работах показано, что распределение площадей озер озерно-термокарстовых равнин отвечает гипотезе возникновения первичных термокарстовых очагов (озер) за сравнительно короткий период [1].

Полная модель морфологической структуры озерно-термокарстовых равнин [3] содержит два свободных изменяющихся параметра, которые и следует выбрать при сравнении морфологической структуры за разные сроки:

– среднее значение логарифма площади озера $a(t)$;

– дисперсия логарифма площади озера $\sigma^2(t)$.

Один из полученных ранее итогов анализа модели — площади термокарстовых озер в любой момент времени имеют логнормальное распределение:

$$f(x, t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma(t)x}} e^{-\frac{(\ln x - a(t))^2}{2\sigma^2(t)}},$$

где t — время, прошедшее с начала процесса.

Для проведения исследований выбраны 8 участков разных в геоморфологическом, геокриологическом и физико-географическом отношении и расположенных в различных регионах — Таймыр, Ямал, Колымская низменность, дельта р. Лена, Аляска (рис. 2). Участки по данным государственной геологической съемки сложены песча-

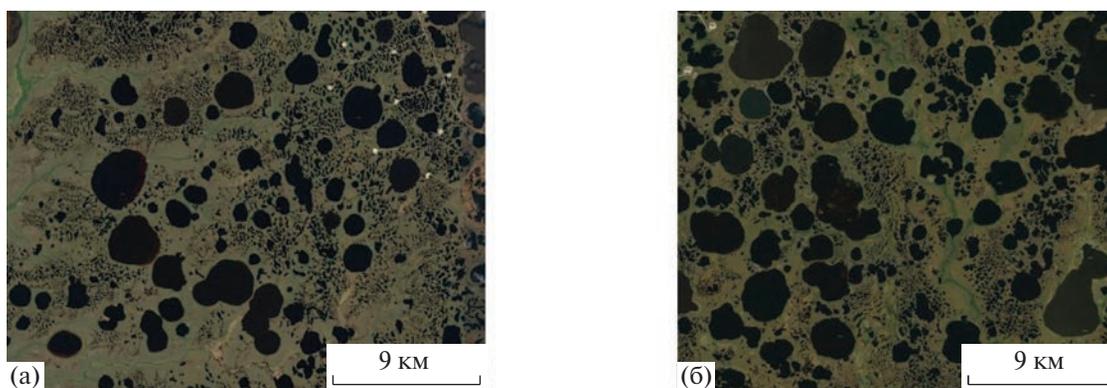
Таблица 1. Характеристика использованных материалов дистанционных съемок

Участок	Срок 1			Срок 2			Период между съемками, лет
	Носитель	Дата съемки	Разрешение, м	Носитель	Дата съемки	Разрешение, м	
<i>Озерно-термокарстовые равнины</i>							
as 3	Corona	22.07.1976	1.2	SPOT 5	14.09.2011	2.5	35
as 10	«	13.07.1964	2.7	SPOT 5	17.07.2011	2.5	47
as 14	Тот же	19.08.1976	1.2	WorldView2	09.07.2014	0.5	38
as 16	«	21.07.1965	2.7	QuickBird	23.06.2011	0.64	46
as 19	«	22.07.1965	2.7	SPOT 5	11.08.2008	2.5	43
as S21	«	14.08.1966	2.7	Тот же	10.08.2008	2.5	42
as 23	«	01.08.1976	1.2	«	05.07.2011	0.64	35
as 31	«	21.08.1968	1.8	Worldview2	24.06.2011	0.5	43
<i>Эрозионно-термокарстовые равнины</i>							
19	Corona	14.08.1967	1.2	WorldView2	28.07.2013	0.5	46
20	Тот же	26.07.1972	1.2	Тот же	24.08.2018	0.5	46
21	«	21.07.1965	4	«	10.07.2013	0.5	48
22	«	21.07.1965	3.4	Sentinel	11.08.2018	10	53
24	«	31.08.1978	3	SPOT 7	15.09.2015	1.5	37
25	«	21.08.1968	2.1	Тот же	03.08.2019	1.5	51
30	«	07.07.1961	2	«	17.09.2017	1.5	56
31	«	04.07.1979	10	WorldView2	01.07.2017	0.5	38
40	«	29.07.1969	2.2	SPOT 7	07.08.2015	1.5	46

ными дельтовыми отложениями; озерно-аллювиальными горизонтально слоистыми алевритами, переслаивающимися с песками и торфами, а также суглинками и супесями; флювиогляциальными песками и валунными суглинками; морскими отложениями, представленными пылеватыми песками, песчаными, супесчаными и суглинистыми отложениями. Для участков характерно сплошное распространение многолетнемерзлых пород.

Пример сравнения распределений площадей озер приведен на рис. 3а,б). Полное сравнение распределений для каждого участка по критерию Смирнова выполнялось помощью программы Statistica 12. Результаты приведены в табл. 2.

Сравнение параметров распределения площадей озер за два срока для озерно-термокарстовых равнин основывалось на критерии Стьюдента и критерии Фишера с учетом логнормальности распределений, результаты приведены в табл. 3 и 4.

**Рис. 1.** Типичные изображения озерно-термокарстовой равнины на материалах космической съемки.

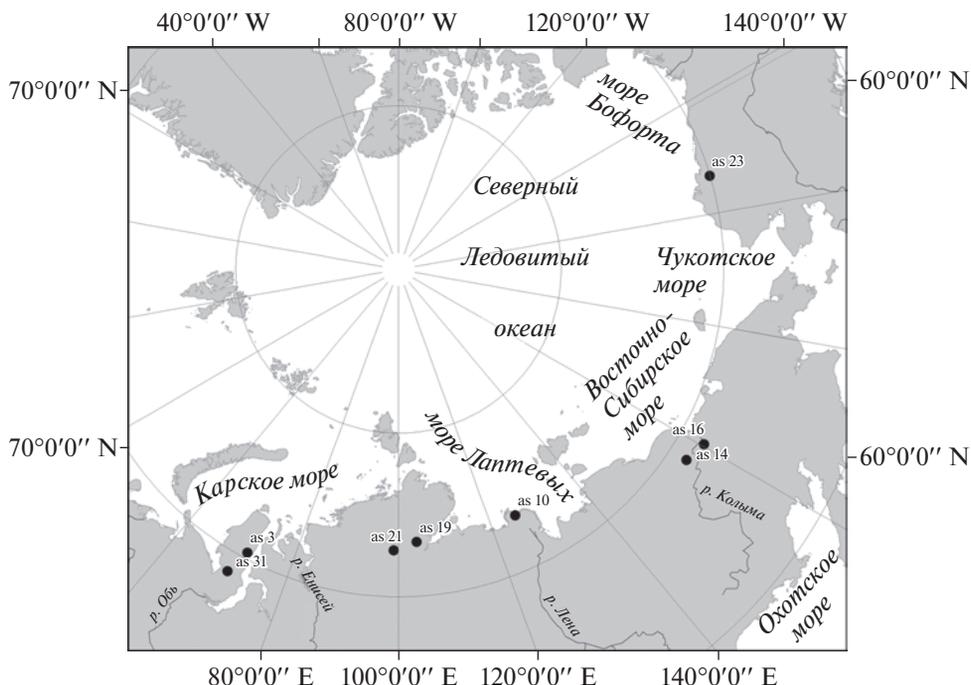


Рис. 2. Схема расположения ключевых участков при изучении озерно-термокарстовых равнин.

Эрозионно-термокарстовая равнина обычно представляет собой слабоволнистую субгоризонтальную поверхность с преобладанием различной тундровой или лесотундровой растительности, в которую вкраплены озера и хасыреи, а также местами развита нечастая эрозионная сеть (рис. 4а,б). Озера часто имеют округлую форму и беспорядочно разбросаны по равнине. Хасыреи представляют собой плоскодонные и пологосклонные заторфованные понижения также изометричной формы, занятые луговой или болотной расти-

тельностью и аналогично озерам в беспорядке располагающиеся на равнине. Внутри хасыреев могут оставаться мелкие остаточные озера по периферии и крупные озера в центральной части. В пределах хасыреев возможно новообразование мерзлоты и развитие бугров пучения. В соответствии с взглядами большинства исследователей, хасыреи образуются в результате осушения термокарстовых озер, чаще всего в результате эрозионной деятельности водотоков.

В выполненных ранее работах показано, что распределение площадей озер эрозионно-термокарстовых равнин отвечает гипотезе постоянного возникновения первичных термокарстовых очагов (озер), это может быть объяснено продолжающимся формированием новых термокарстовых озер в пределах постоянно возникающих хасыреев.

Разработанная модель морфологической структуры эрозионно-термокарстовой равнины (например, [2]) позволила показать, что при весьма общих условиях при длительном времени развития наступает состояние динамического равновесия, характеризующееся стабилизацией большинства характеристик, в частности, следующих:

- распределение площади озера (плотность распределения) при площади первичного термокарстового понижения ϵ (интегрально-экспоненциальное распределение):

$$f_{sl}(x, \infty) = -\frac{1}{x \text{Ei}(-\gamma\epsilon)} e^{-\gamma x}, \quad x \geq \epsilon,$$

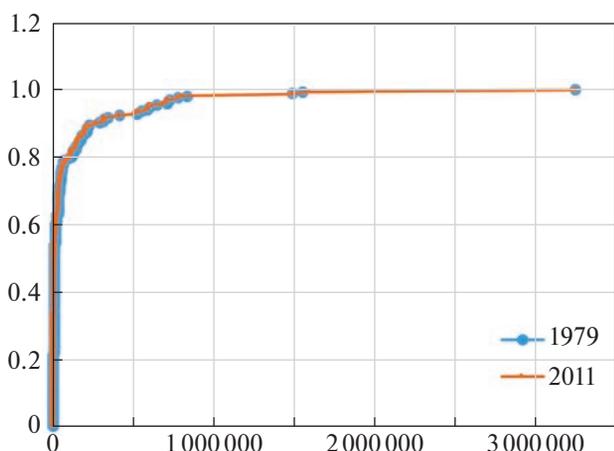


Рис. 3. Пример сопоставления распределений площадей озер за разные сроки в пределах озерно-термокарстовых равнин (участок as3).

Таблица 2. Сопоставление распределения площадей озер термокарстовых равнин за два срока с использованием критерия Смирнова *

Участок	Объем выборки		Значение критерия	p
	Срок 1	Срок 2		
<i>Озерно-термокарстовые равнины</i>				
as3	180	176	0.152	p < 0.05
as10	167	167	0.036	p > 0.10
as14	153	154	0.048	p > 0.10
as16	584	576	0.031	p > 0.10
as19	209	209	0.038	p > 0.10
as21	351	345	0.024	p > 0.10
as23	109	108	0.048	p > 0.10
as 1	207	210	0.028	p > 0.10
<i>Эрозионно-термокарстовые равнины</i>				
20	359	372	0.150	p < 0.001
21	430	433	0.040	p > 0.10
24	381	362	0.100	p < 0.05
25	314	309	0.073	p > 0.10
19	205	205	0.078	p > 0.10
22	291	298	0.056	p > 0.10
30	524	522	0.043	p > 0.10
31	100	95	0.040	p > 0.10
40	553	549	0.043	p > 0.10

*Для значимого различия двух выборок на уровне 0.95 должно быть $p < 0.05$, подобные случаи выделены жирным шрифтом.

Таблица 3. Результаты сравнения значений среднего логарифма площадей озер за два срока

Участок	Среднее логарифма площади		Критерий Стьюдента	Критическое значение на уровне 0.95
	1 срок	2 срок		
as3	9.64	9.42	1.05	1.96
as10	11.94	11.92	0.13	То же
as14	11.63	11.55	0.53	«
as16	10.14	10.17	0.29	«
as19	10.90	10.92	0.16	«
as21	10.83	10.82	0.10	«
as 3	12.21	12.17	0.21	«
as31	9.11	8.99	0.22	«

— распределение площади хасырея (экспоненциальное распределение):

$$F(x) = 1 - e^{-\gamma(x-\varepsilon)}, \quad x \geq \varepsilon$$

— средняя плотность расположения термокарстовых озер:

$$\tau_i = -\frac{\lambda}{2a} Ei(-\varepsilon\gamma)[1 - P^*],$$

— заозеренность, удовлетворяющая выражению:

$$\ln(1 - P^*) = -\frac{\lambda}{2\gamma a} e^{-\gamma\varepsilon} [1 - P^*],$$

где a — скорость роста среднего логарифма площади, λ — среднее число озер, возникающих в единицу времени на единице площади; γ — средняя плотность расположения истоков эрозионных форм.

Таблица 4. Результаты сравнения дисперсии логарифма площадей озер за два срока

Участок	Дисперсия логарифма площади		Критерий Фишера	Критическое значение на уровне 0.95
	1 срок	2 срок		
as3	3.50	4.30	1.23	1.14*
as10	2.04	2.07	1.02	1.18
as14	1.64	1.81	1.10	1.18
as16	2.97	3.12	1.05	1.06
as19	1.51	1.54	1.02	1.14
as21	1.53	1.61	1.05	1.10
as 3	1.88	1.95	1.04	1.26
as31	5.64	5.48	1.01	1.14

* Случай статистически значимого различия выделен жирным шрифтом.

Таким образом, как видно из приведенных выражений, основными формальными параметрами, полностью характеризующими все свойства морфологической структуры при ее развитии, которые определяют значения всех других количественных характеристик, являются:

– отношение плотности генерации новых термокарстовых очагов и скорости роста логарифма размера $\frac{\lambda}{a}$,

– среднее значение плотности расположения истоков эрозионных форм γ ,

– площадь первичного термокарстового понижения ϵ .

Вместо данных формальных параметров при изучении изменения морфологической структуры может быть использован другой набор параметров:

– средняя площадь термокарстового озера \bar{s}_i ,

– средняя плотность расположения термокарстовых озер η ,

– площадь первичного термокарстового очага (последний не использовался в силу незначительного изменения).

Эти параметры, как нетрудно получить на основе приведенных соотношений, взаимодостоверно связаны с первым набором:

$$\bar{s}_i = -\frac{1}{\gamma Ei(-\gamma\epsilon)} e^{-\gamma\epsilon}, \quad \eta = -\frac{\lambda}{2a} Ei(-\gamma\epsilon) e^{-\eta\bar{s}_i}, \quad (6)$$

и в силу этого также полностью характеризуют структуру и ее изменение. Кроме того, они прямо определяются по измерениям, а значимость их изменений легко поддается статистической оценке.

Анализ изменений морфологической структуры эрозионно-термокарстовых равнин проводился на базе ключевых участков, для которых имелось два срока наблюдения (срок 1: 1961–1979 гг., срок 2: 2013–2019 гг.). Выбранные 9 участков представляют основные исследованные нами регионы криолитозоны и расположены на севере Западно-Сибирской низменности, в устье р. Лена, в Восточной Сибири, на Баффиновой Земле (рис. 5). Участки сложены аллювиально-морскими-

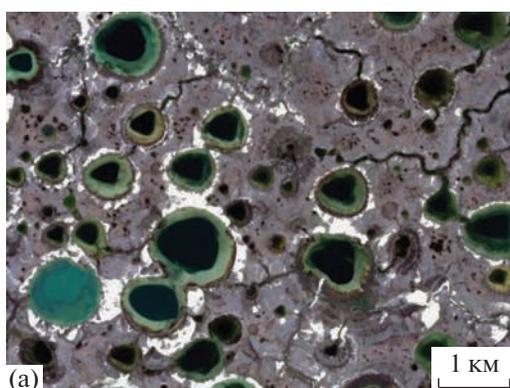


Рис. 4. Типичное изображение эрозионно-термокарстовой равнины на космическом снимке.

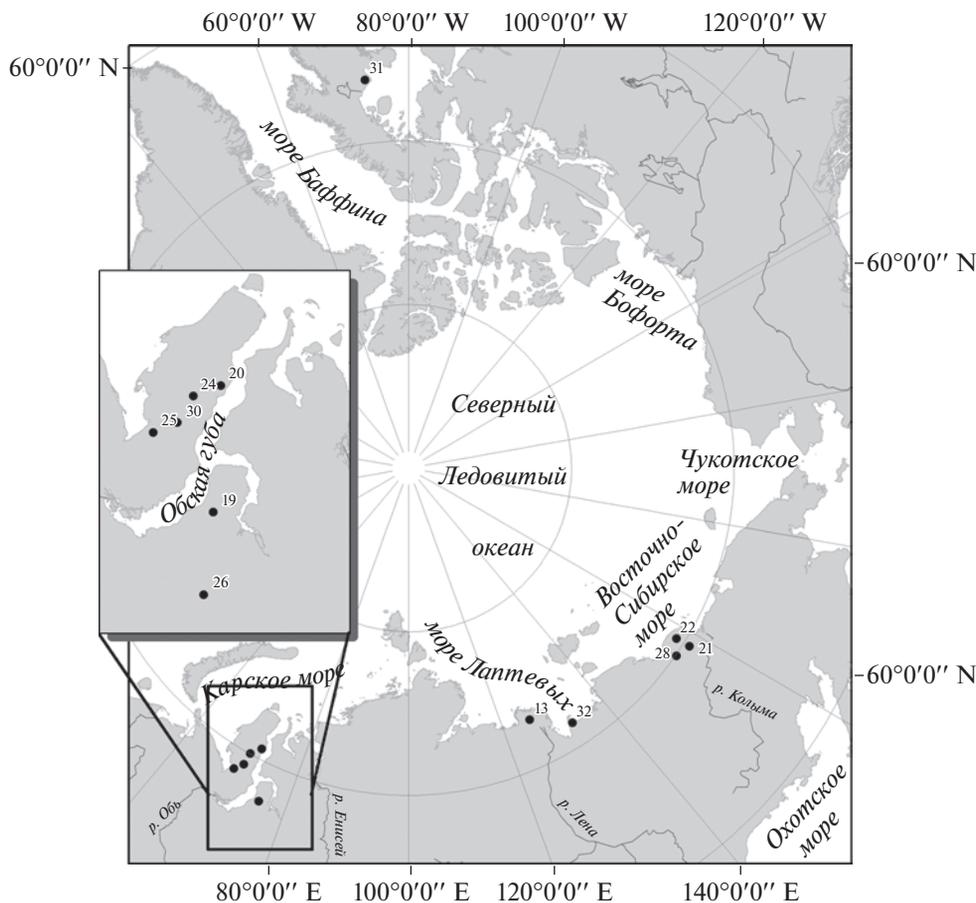


Рис. 5. Схема расположения ключевых участков эрозионно-термокарстовых равнин.

ми отложениями, супесями и песками, озерно-болотными образованиями, морскими отложениями, представленными желто-бурыми песками, мелко- и среднезернистыми. Для участков характерно сплошное распространение ММП.

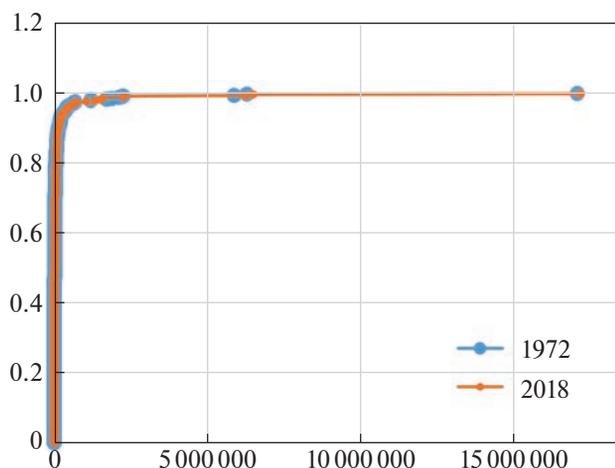


Рис. 6. Пример сопоставления распределений площадей озер за разные сроки в пределах озерно-термокарстовых равнин (участок 20).

Проведенное сопоставление распределений площадей озер за два срока позволило получить результаты, отраженные в табл. 1 и на рис. 6.

Оценим значимость различий выбранных параметров, полностью отражающих морфологическую структуру. Значения, как средней площади озер, так и плотности расположения озер представляют собой суммы большого числа случайных величин, и поэтому согласно центральной предельной теореме их распределение близко к нормальному; это позволяет нам использовать критерий Стьюдента для оценки значимости различий этих параметров (табл. 5, 6).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В целом проведенное исследование позволяет сделать вывод, что использование материалов космических съемок дает достоверную информацию об изменении морфологической структуры ландшафтов криолитозоны в связи с климатическими изменениями, наземными методами подобные изменения зафиксировать крайне сложно, в отличие от изменения отдельных компонентов ландшафта.

Таблица 5. Сопоставление изменений средней площади озера на ключевых участках эрозионно-термокарстовых равнин

Участок	Площадь участка, км ²	Средняя площадь озера, км ²		Критерий Стьюдента	Критическое значение критерия на уровне 0.95
		1 срок	2 срок		
19	207	0.049	0.043	0.53	1.96
20	450	0.126	0.134	0.11	То же
21	1158	0.225	0.233	0.20	«
22	2867	0.314	0.333	0.23	«
24	154	0.073	0.072	0.03	«
25	202	0.083	0.075	0.72	«
30	442	0.058	0.054	0.61	«
31	846	0.908	0.761	0.83	«
40	670	0.032	0.028	1.04	«

Таблица 6. Сопоставление изменений средней плотности расположения озер на ключевых участках эрозионно-термокарстовых равнин

Участок	Средняя плотность расположения озер, км ⁻²		Критерий Стьюдента	Критическое значение на уровне 0.95
	1 срок	2 срок		
19	0.99	0.99	0	1.96
20	0.80	0.83	0.50	То же
21	0.37	0.37	0	«
22	0.10	0.10	0	«
24	2.47	2.35	0.68	«
25	1.55	1.53	0.16	«
30	1.19	1.18	0.14	«
31	0.12	0.11	0.61	«
40	0.83	0.82	0.20	«

Анализ результатов обработки заставляет сделать вывод, что изменение распределений площадей термокарстовых озер эрозионно-термокарстовых равнин носит ограниченный характер.

Проверка статистических различий между выборками 1961–1979 и 2013–2019 гг. для каждого ключевого участка эрозионно-термокарстовых равнин по критерию Смирнова не выявила статистические значимые различия в распределениях площадей озер в 7 случаях из 9 (см. табл. 2), и различия наблюдаются только на двух участках. Дополнительный анализ показал, что при этом на одном из этих участков изменения носят плавный характер с сохранением интегрально-экспоненциального вида распределения площадей озер, а значит с сохранением динамического равновесия. Анализ изменений основных параметров (см. табл. 5 и 6) показывает несущественные отличия (на уровне 0.95) по критерию Стьюдента.

Морфологическая структура озерно-термокарстовых равнин, прежде всего ее количественные характеристики, которые, как вытекает из математической модели, полностью описывают эту структуру, по данным, полученным на ключевых участках, не демонстрирует в настоящее время реальной трансформации, несмотря на происходящие климатические изменения.

Действительно оценка значимости статистических различий между двумя выборками площадей термокарстовых озер за 1964–1976 и 2008–2014 гг. по критерию Смирнова для каждого ключевого участка выявила статистически значимое различие только для одного участка а3 (см. табл. 2). Сравнение параметров моделей – средних логарифмов площадей термокарстовых озер для двух сроков по каждому участку и аналогично дисперсий логарифмов площадей термокарстовых озер (см. табл. 3, 4) – показало некоторое уменьшение

среднего логарифма на всех участках за исключением двух (as19, as16) и некоторый рост дисперсии на всех участках за исключением одного (as31). Однако применение статистических критериев Фишера и Стьюдента подтверждает отсутствие значимых (на уровне значимости 0.95) различий соответствующих параметров для двух сроков съемки; отличия на названном уровне значимости обнаружены только для дисперсии участка as3.

Таким образом, можно сделать вывод, что изменение морфологической структуры эрозионно-термокарстовых равнин в связи с климатическими изменениями протекает несколько более интенсивно, чем у озерно-термокарстовых равнин; изменения затронули 22% ключевых участков против 12% у озерно-термокарстовых равнин.

Представляется интересным, что ключевые участки, на которых выявлены изменения, тяготеют к полуострову Ямал, это относится и к озерно-термокарстовым и к эрозионно-термокарстовым равнинам. В целом три участка, на которых отмечаются статистически значимые изменения из 17 изученных ключевых участков термокарстовых равнин расположены на названной территории. Конечно число ключевых участков пока недостаточно для уверенных выводов, однако возможно обнаруженная приуроченность указывает на более интенсивный ход изменений именно в этом районе.

Представляется вероятным, что устойчивость морфологических структур (ландшафтного рисунка), прежде всего количественных характеристик к климатическим изменениям, несколько выше, чем отдельных компонентов ландшафта.

Различная степень изменения морфологической структуры проанализированных ландшафтов может быть объяснена тем, что на климатические изменения в первую очередь реагируют эрозионные, а не термокарстовые процессы, изменение эрозионных процессов приводит к изменению распределений площадей термокарстовых озер эрозионно-термокарстовых равнин при интенсификации их спуска и превращения в ха-сыреи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Викторов А.С., Капралова В.Н., Орлов Т.В., Трпезникова О.Н. и др. Анализ развития морфологической структуры озерно-термокарстовых равнин на основе математической модели // Геоморфология. 2015. № 3. С. 3–13.
2. Викторов А.С., Капралова В.Н., Орлов Т.В., Трпезникова О.Н. и др. Математическая морфология ландшафтов криолитозоны. 2016. М.: РУДН, 232 с.
3. Викторов А.С. Математическая модель термокарстовых озерных равнин как одна из основ интерпретации материалов космических съемок // Исследование Земли из космоса. 1995. № 5. С. 42–50.
4. Методическое руководство по инженерно-геологической съемке масштаба 1 : 200 000 (1 : 100 000–1 : 500 000) / ВНИИ гидрогеологии и инж. Геологии. [Е.С. Мальников, Н.Г. Верейский, Л.А. Островский и др.]. М.: Недра. 1978. 391 с.
5. Полищук В.Ю., Полищук Ю.М. Геоимитационное моделирование полей термокарстовых озер в зонах мерзлоты: монография. Ханты-Мансийск: УИП ЮГУ, 2013. 128 с.
6. Grosse G., Romanovsky V., Walter K. et al. Distribution of thermokarst lakes and ponds at three yedoma sites in Siberia. 2008.
7. Kravtsova V.I., Rodionova T.V. Research of the dynamics of the area and number of thermokarst lakes in different regions of the permafrost zone of Russia using satellite images // Cryosphere of the Earth. 2016. V. 20. № 1. P. 81–89.
8. Kotlyakov V.M., Velichko A.A., Glazovsky A.F., Tumska-ya V.E. The past and present of the Arctic cryosphere // Bulletin of the Russian Academy of Sciences, 2015. V. 85. No 5–6. P. 463–471.
9. Morgenstern A., Overduin P.P., Günther F., et al. Thermo-erosional valleys in Siberian ice-rich permafrost // Permafrost and Periglac Process. 2020. N. 32 (1). P. 59–75.
<https://doi.org/10.1002/ppp.2087>
10. Muster S. et al. Size distributions of Arctic waterbodies reveal consistent relations in their statistical moments in space and time // Frontiers in Earth Science. 2019. V. 7. P. 5.
<https://doi.org/10.3389/feart.2019.00005>
11. Muster S., Roth K., Langer M., Lange S., et al. PeRL: a circum-Arctic Permafrost Region Pond and Lake database // Earth Syst. Sci. Data, 2017. V. 9. P. 317–348.
<https://doi.org/10.5194/essd-9-317-2017>
12. Nicolsky D.J., Romanovsky V.E., Panda S.K., Marchenko S.S., Muskett R.R. Applicability of the ecosystem type approach to model permafrost dynamics across the Alaska North Slope // J. Geophys. Res. Earth Surf. 2017. V. 122. P. 50–75.
<https://doi.org/10.1002/2016JF003852>
13. Nitze I., Grosse G., Jones B.M., Arp C.D., et al. Landsat-Based Trend Analysis of Lake Dynamics across Northern Permafrost Regions // Remote Sensing. 2017. V. 9. № 7.
<https://doi.org/10.3390/rs9070640>
14. Olefeldt D., Goswami S., Grosse G., Hayes D.J., et al. Arctic Circumpolar Distribution and Soil Carbon of Thermokarst Landscapes // Nature Communications. 2016.
<https://doi.org/10.3334/ORNDAAC/1332>
15. Pekel J.-F., Cottam A., Gorelick N., Belward A. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes // Nature. 2016.
<https://doi.org/10.1038/nature20584>

EVALUATION OF CLIMATE-INDUCED EVOLUTION OF THE MORPHOLOGICAL STRUCTURE OF THERMOKARST PLAINS IN THE PERMAFROST ZONE USING REMOTE SENSING DATA

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

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

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

Changing geocryological conditions and the permafrost zone landscape due to climate change is currently an acute issue actively studied by many researchers. However, insufficient attention is paid to the change in the morphological structure and quantitative analysis. The aim of the study was a quantitative analysis of morphological structure of the thermokarst plains with fluvial erosion and lacustrine thermokarst plains. The study was carried out based on satellite imagery, including archival images of Corona with a resolution of 3–12 m/pix, for 1961–1979, and a set of modern high-resolution images of 0.5–2.5 m/pix for 2008–2019. Analysis of changes in the morphological structure of thermokarst plains was carried out in 9 key areas located in the zone of continuous permafrost, in the north of the West Siberian Lowland, at the mouth of the Lena River, in Eastern Siberia, on Baffin Island. Checking statistical differences between samples 1961–1979 and 2013–2019 using the Smirnov criterion revealed statistically significant differences in the distributions of lake areas of the thermokarst plains with fluvial erosion in only two sites. In one of these areas, the changes are of a smooth and integral-exponential form of the distribution of lake areas preserved. Assessment of the significance of statistical differences for 1964–1976 and 2008–2014 for the thermokarst plains revealed a significant difference for only one area. The change in the morphological structure of the thermokarst plains with fluvial erosion due to climatic changes is more intense than that of thermokarst plains; changes affected 22% of key areas versus 12% near thermokarst plains with fluvial erosion. Key areas where changes have been identified are located on the Yamal Peninsula. The resistance of morphological structures to climatic changes is higher than that of individual components of the landscape. Erosion processes are the first to respond to climatic changes, and the change in these processes leads to a change in the distribution of the areas of thermokarst lakes in thermokarst plains with fluvial erosion during the intensification of their descent and transformation into khasyreys.

Keywords: *cryolithozone, thermokarst, mathematical model, morphological structure, satellite imagery*

REFERENCES

- Viktorov, A.S., Kapralova, V.N., Orlov, T.V., Trapeznikova, O.N., et al. *Analiz razvitiya morfologicheskoi struktury ozero-termokarstovykh ravnin na osnove matematicheskoi modeli* [Analysis of the development of the morphological structure of lacustrine-thermokarst plains based on a mathematical model]. *Geomorfologiya*, 2015, no. 3, pp. 3–13. (in Russian)
- Viktorov, A.S., Kapralova, V.N., Orlov, T.V., Trapeznikova, O.N., et al. *Matematicheskaya morfologiya landshaftov kriolitozony* [Mathematical morphology of permafrost landscapes]. Moscow, RUDN Publ., 2016, 232 p. (in Russian)
- Viktorov, A.S. *Matematicheskaya model' termokarstovykh ozernykh ravnin kak odna iz osnov interpretatsii materialov kosmicheskikh s'emok* [Mathematical model of thermokarst lacustrine plains as one of the bases for interpreting satellite imagery data]. *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 1995, no. 5, pp. 42–50. (in Russian)
- Metodicheskoe rukovodstvo po inzhenerno-geologicheskoi s'emke masshtaba 1 : 200000 (1 : 100000–1 : 500000)* [Guidelines for engineering geological surveying at a scale of 1:200000 (1:100000–1:500000)]. E.S. Malnikov, N.G. Vereiskii, L.A. Ostrovskii, et al. Moscow, Nedra Publ., 1978, 391 p. (in Russian)
- Polishchuk, V.Yu., Polishchuk, Yu.M. *Geoimitatsionnoe modelirovanie polei termokarstovykh ozer v zonakh merzloty* [Geosimulation modeling of fields of thermokarst lakes in permafrost zones]. Khanty-Mansiysk, UIP YUGU Publ., 2013, 128 p. (in Russian)
- Grosse, G., Romanovsky V., Walter, K. et al. Distribution of thermokarst lakes and ponds at three yedoma sites in Siberia // Proc. ninth international conference on Permafrost, 2008, pp. 551–556.
- Kravtsova, V.I., Rodionova, T.V. Research of the dynamics of the area and number of thermokarst lakes in different regions of the permafrost zone of Russia using satellite images. *Cryosphere of the Earth*, 2016, vol. 20, no. 1, pp. 81–89.
- Kotlyakov, V.M., Velichko, A.A., Glazovsky, A.F., Tumskaya, V.E. The past and present of the Arctic cryosphere. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences*, 2015, vol. 85, no. 5/6, pp. 463–471.
- Morgenstern, A., Overduin, P.P., Günther, F. et al. Thermo-erosional valleys in Siberian ice-rich permafrost.

- frost. *Permafrost and Periglacial Process*, 2020. no. 32 (1), pp. 59–75. <https://doi.org/10.1002/ppp.2087>
10. Muster, S. et al. Size distributions of Arctic waterbodies reveal consistent relations in their statistical moments in space and time, *Frontiers in Earth Science*. 2019, vol. 7, p. 5.
 11. Muster, S., Roth, K., Langer, M., Lange, S., et al. PeRL: a circum-Arctic Permafrost Region Pond and Lake database, *Earth Syst. Sci. Data*, 2017, vol. 9, pp. 317–348. <https://doi.org/10.5194/essd-9-317-2017>
 12. Nicolsky, D.J., Romanovsky, V.E., Panda, S.K., et al. Applicability of the ecosystem type approach to model permafrost dynamics across the Alaska North Slope. *J. Geophys. Res. Earth Surf.*, 2017, vol. 122, pp. 50–75. <https://doi.org/10.1002/2016JF003852>
 13. Nitze, I., Grosse, G., Jones, B.M., et al. Landsat-based trend analysis of lake dynamics across Northern permafrost regions, *Remote Sens.*, 2017, no. 9, p. 640. <https://doi.org/10.3390/rs9070640>
 14. Olefeldt, D., Goswami, S., Grosse, G., Hayes, D.J., et al. Arctic circumpolar distribution and soil carbon of thermokarst landscapes. *Nature Communications*, 2016. <https://doi.org/10.3334/ORNLDAAC/1332>
 15. Pekel, J.-F., Cottam, A., Gorelick, N., Belward, A. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. *Nature*, 2016, 540 p. <https://doi.org/10.1038/nature20584>

УДК 556.314

ГЕОХИМИЯ И УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ СОСТАВА ПОДЗЕМНЫХ ВОД В ОБЛАСТИ РАЗВИТИЯ МЕЗОЗОЙСКИХ ОТЛОЖЕНИЙ В РЕСПУБЛИКЕ ТАТАРСТАН

© 2023 г. Р. Х. Мусин^{1,*}, А. Д. Хамитов^{1,**}, З. Г. Калкаманова^{1,***}

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

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

**E-mail: khamitov07.03@gmail.com

***E-mail: fayzrahmanowa.z@yandex.ru

Поступила в редакцию 21.12.2022 г.

После доработки 17.02.2023 г.

Принята к публикации 21.02.2023 г.

Мезозойские отложения развиты в юго-западной части Республики Татарстан на площади 2870 км². Они представлены мощной (до 390 м) толщей морских преимущественно глинистых образований, содержащих маломощные (до 1 м) прослои песчаников и мергелей. Эта толща подстилается пермскими полигенными сульфатно-карбонатно-терригенными отложениями, которые обнажаются севернее области развития мезозойских отложений. Изученная территория (~5000 км²) отличается сельскохозяйственным уклоном производственной деятельности. Здесь отсутствуют крупные населенные пункты и промышленные предприятия. В работе рассмотрены особенности состава подземных вод мезозойских и пермских отложений (шесть водоносных и слабоводоносных комплексов) на основе данных площадного гидрогеохимического опробования 1996–2001 и 2019–2020 гг. (1275 анализов). Показана намечающаяся тенденция улучшения качественных показателей подземных вод во времени, обусловленная снижением техногенного пресса. Выявлены и охарактеризованы латеральная и вертикальная гидрогеохимические зональности, которые определяются интенсивностью водообмена, минералого-геохимическим комплексом водовмещающих пород и особенностями питания подземных вод. Обоснована перспективность территории на выявление минеральных лечебных вод, бальнеологические свойства которых определяются повышенными содержаниями органических веществ, кремниеслоты, железа, сероводорода, а также вод группы “без специфических компонентов и свойств”.

Ключевые слова: факторы и процессы формирования состава подземных вод, качество воды, солеотложение, минеральные лечебные воды

DOI: 10.31857/S0869780923020066, EDN: TWLLQD

ВВЕДЕНИЕ

Республика Татарстан (РТ) расположена на востоке Русской платформы, в пределах Волго-Уральской антеклизы. Мезозойские образования развиты здесь лишь по правобережью Куйбышевского водохранилища, в крайней юго-западной части Татарстана (это южная часть Предволжского региона РТ), где они перекрывают пермские образования. Максимальная мощность мезозойских отложений – 390 м, площадь их развития ~2870 км². Они легко распознаются по темно-серой (до черной) окраске, резкому преобладанию глинистых разностей, а также обилию полиминеральных конкреций и фаунистических остатков [2, 14]. Мезозойский осадочный комплекс во многом определяет гидрогеологические условия обширной террито-

рии, в первую очередь, проблематичность организации качественного хозяйственно-питьевого водоснабжения. Водопроводящая часть разреза преимущественно представлена довольно маломощными прослоями тонко-, мелкозернистых песчаников, характеризующихся низкой водопроводимостью. Поэтому водозаборные скважины часто полностью пересекают мезозойскую глинистую толщу и их фильтры устанавливаются на уровне коллекторов пермских отложений. Глубина таких скважин может превышать 300 м, а качество перехватываемых подземных вод (ПВ) не соответствует питьевым стандартам. Повышенная минерализация (3–7 г/л) обычно сопровождается высокими значениями жесткости (до 50 ммоль/л и более, здесь и далее под жесткостью понимается общая жесткость) и сверхнормативными концен-

трациями SO_4^{2-} , $\text{Fe}_{\text{общ}}$, В, реже Sr, Br, Al, Se и некоторых др. компонентов. Питьевая некондиционность ПВ за счет жесткости и/или Fe, В, Mn и кремнекислоты может проявиться и при отсутствии негативного влияния какого-либо антропогенного или техногенного фактора, и при вскрытии водоносных горизонтов на небольших глубинах 40–60 м, как в толще самих мезозойских отложений, так и в составе пермских образований, залегающих под маломощным мезозойским чехлом.

Мезозойские отложения обогащены органическим веществом. Его выщелачивание и концентрирование могут привести к формированию минеральных лечебных вод. Их примером является вода известной торговой марки “Волжанка”, разливаемая в пос. Ундоры (Ульяновская обл.), который расположен в 4–5 км южнее границы РТ. В самом Татарстане в последние 10 лет в разрезе юрских отложений выявлены аналогичные ПВ. Водозаборная скважина и цех розлива находятся в пос. Большие Тарханы (в 15 км северо-восточнее пос. Ундоры). Вода реализуется как “Тарханская–3” [11]. Один из первооткрывателей Тарханского месторождения – профессор Р.Л. Ибрагимов – считает, что источником органических веществ являются тела битумов, залегающих в подстилающих пермских отложениях [8].

Выявление условий формирования состава ПВ в мезозойской толще, природы повышенных концентраций отмеченных компонентов и органического вещества, особенностей влияния вод мезозойских отложений на ПВ пермских образований, а также характера и динамики изменения во времени их состава представляют значительный научно-практический интерес.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования являлись ПВ пермских и мезозойских отложений Предволжского региона РТ, площадь которого составляет ~9700 км². Гидрогеологические условия данной территории изучались в 1996–2001 гг. в ходе проведения гидрогеологосъемочных работ масштаба 1:200000. Исследования в северной части региона выполнены специалистами ФГУП “Волгагеология” (Кочуров Е.Ю. и др., 2001), а в южной – ТГРУ ПАО “Татнефть” (А.В. Солнцев и др., 2001). Значительный фактический материал этих работ (более 1500 анализов ПВ) позволяет проводить различного рода построения и обобщения. В 2019–2020 гг. ПВ региона подвергнуты площадному опробованию ГУП “Геоцентр РТ” в ходе выполнения мониторинговых исследований (500 гидропроб). Аналитика этих двух этапов опробования включает: рН, сухой остаток, жесткость, перманганатную окисляемость, кремнекислоту; ионный состав: HCO_3^- ,

CO_3^{2-} , SO_4^{2-} , Cl^- , NO_3^- , NO_2^- , PO_4^{3-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , $(\text{Na}+\text{K})^+$, NH_4^+ ; микрокомпонентный состав: Al, As, B, Ba, Be, Br, Cd, Cu, Cr, F, $\text{Fe}_{\text{общ}}$, I, Mn, Mo, Ni, Pb, Se, Sr, Zn, нефтепродукты.

Предволжский регион расположен в пределах Волго-Сурского артезианского бассейна, на северной окраине Приволжской возвышенности. Здесь денудационные и эрозионно-аккумулятивные поверхности чередуются в гипсометрическом интервале 53 м (НПУ Куйбышевского вдхр.) – 270 м (ЮЗ часть региона). Наиболее крупная река – Свияга. Ее долина протягивается в субмеридиональном направлении параллельно руслу р. Волга и делит площадь региона на две примерно равные части. В указанном гипсометрическом интервале вскрываются пермские, юрско-меловые и плиоцен-четвертичные отложения. Первые представлены образованиями казанского и уржумского ярусов средней перми, а также северодвинского и вятского ярусов верхней перми.

Морской сероцветный терригенно-сульфатно-карбонатный комплекс казанских отложений имеет мощность около 100 м. В его составе преобладают карбонатные породы, на долю которых приходится 55–100% разреза. Подчиненную роль играют гипсы и ангидриты (до 40%), глины (до 15%), алевриты (до 7%) и песчаники (до 6%) [14]. Мощности отдельных прослоев могут достигать 9 м, но в основном они находятся в диапазоне 3–5 м. На некоторых участках отмечается битуминизация пород.

На основе особенностей строения разрезов и палеонтологической характеристики различают верхнеказанский и нижнеказанский подъярусы, обладающие мощностями до 50 м, редко более. Вдоль долин рек в пределах положительных структур вскрываются лишь верхнеказанские отложения. Их кровля в северной и центральной части региона расположена на отметках (30–50) – (90–114) м. В южной части Предволжья эти отметки составляют минус (40–70) м, а в юго-западной – минус (80–140) м. Уржумские и верхнепермские отложения имеют близкий состав и сходное строение. Это чередование континентальных красноцветных песчаников, алевритов и глин, содержащих прослой мергелей, известняков и доломитов. Породы обычно не выдержаны по простиранию, характеризуются незакономерной сменой по разрезу и наличием размывов. Мощности прослоев редко превышают 5–6 м. В этом карбонатно-терригенном матрикс присутствуют гипсы в виде отдельных зерен, корочек, линзовидных прослоев (толщиной до 1.5 м) и прожилков. Общая мощность уржумских отложений достигает 110 м, а верхнепермских (татарских) – 130 м [14].

Юрские образования с размывом перекрывают пермские. Их стратиграфический диапазон — от батского яруса средней юры до титонского (волжского) яруса верхней юры. Общая мощность 100–120 м. Они представлены преимущественно морскими сероцветными глинами, содержащими маломощные прослой тонко-, мелкозернистых песков и мергелей. Глины в основании разреза безызвестковые, в средней и верхней части известковистые. Они часто содержат мелкую вкрапленность пирита, железистые конкреции. Практически по всему разрезу участками отмечаются выделения гипса в виде мелких зерен и корочек, а также лимонит-гипсовых конкреций. В его нижней части отмечаются многочисленные углефицированные растительные остатки. Примерно в центральной части — многочисленные конкреции мергелей. Пески обычно глауконит-кварцевые, мощности их прослоев редко превышают 0.5–1.0 м. Максимальная обогащенность псаммитовым материалом отмечается в основании и прикровельной части — на уровне батского и волжского ярусов. В пределах последнего также встречаются глины с прослоями горючих сланцев, и отмечаются прослой (0.1 м) конгломератов с галькой фосфоритов. Дополнительной особенностью разреза являются значительное количество фаунистических остатков и обогащенность органическим веществом [14]. Так, содержание органики в волжских горючих сланцах, представленной сапропелевым коллоальгинитом, составляет 18–25% [15]. Стратиграфическая полнота разрезов увеличивается в южном и юго-западном направлениях. Структурная поверхность по кровле батских отложений в этих направлениях плавно снижается от 180–216 м до минус (70–113 м), ее средний уклон ~0.004. В зонах максимального погружения юры отмечается размыв пермских отложений вплоть до верхнеказанского подъяруса включительно.

Стратиграфический диапазон меловых отложений — от готеривского яруса нижнего мела до кампанского верхнего мела. Площадь их развития ~1500 км². Нижнемеловые образования общей мощностью до 210 м во многом подобны юрским. В разрезе преобладают глинистые породы. Также отмечаются конкреции мергелей, тонкая вкрапленность пирита, выделения гипса. Присутствуют прослой глинистых сланцев с обильным растительным детритом. Основной объем невыдержанных прослоев (до 1.0 м) песчаников, реже мергелей приходится на альбский ярус. В верхнем отделе мощностью до 62 м наряду с глинами довольно широко распространены песчаники, мергели, мел и опоки. Мергели и опоки участками цеолитоносные [2, 14].

Основные поля развития плиоцен-четвертичных отложений — речные долины, в первую очередь, долина р. Свияга. Ее ширина достигает 10–

12 км. Мощность аллювия — до 150 м. В его нижней части обычно развиты пески, реже гравийники и галечники, а в верхней — супесчано-суглинистые породы.

В охарактеризованной осадочной толще локализованы межпластовые ПВ с широко варьирующим составом и минерализацией. Они образуют междуречные потоки, основными областями питания которых являются водораздельные пространства, а разгрузки — речные долины и Куйбышевское вдхр. В разрезе водоносные горизонты связаны межпластовым взаимодействием по схеме А.Н. Мятлева [1]. В зоне развития пресных ПВ могут быть выделены следующие водоносные и слабоводоносные комплексы: плиоцен-четвертичный (N₂-Q), меловой (K), юрский (J), татарский (P₃t), уржумский (P₂ur), верхне- (P₂kz₂) и нижнеказанский (P₂kz₁). Ресурсы пресных ПВ составляют 928.7 тыс. м³/сут, а величина разведанных запасов — 74 тыс. м³/сут. Основная часть месторождений пресных ПВ сосредоточена в плиоцен-четвертичных отложениях долины р. Свияга. Предволжский регион является сельскохозяйственным. Здесь нет крупных населенных пунктов и промышленных предприятий. Численность населения ~130 тыс. человек, степень залесенности — 12% [5].

Решение основных задач проводилось на основе обработки гидрогеохимической информации двух отмеченных выше этапов изучения территории. Аналитические данные по родникам и скважинам первоначально были привязаны к гидрогеологическим подразделениям. Далее они распределены по 24 водосборным бассейнам, представляющим достаточно изолированные гидрогеодинамические системы примерно с едиными условиями формирования состава ПВ (рис. 1).

Границы бассейнов представлены крупными поверхностными водоразделами, обычно являющимися и водоразделами ПВ, а также крупными речными долинами — основными зонами разгрузки. Площади этих структур — 200–600 км². Для получения данных, свободных от флуктуаций ландшафтных и техногенных условий, опробованные водопункты были оцифрованы. Учитывалось соотношение лесных и полевых участков на водосборной площади; расположение в областях питания, транзита и разгрузки, а также относительно населенных пунктов, являющихся в Предволжье РТ основными источниками загрязнения ПВ. Учет перечисленных параметров крайне необходим для родников и скважин, дренирующих первые от поверхности водоносные горизонты и комплексы. Далее аналитическая информация по составам ПВ, дополненная данными по водопунктам (дебит, глубина залегания и др.), была подвергнута статистическому анали-

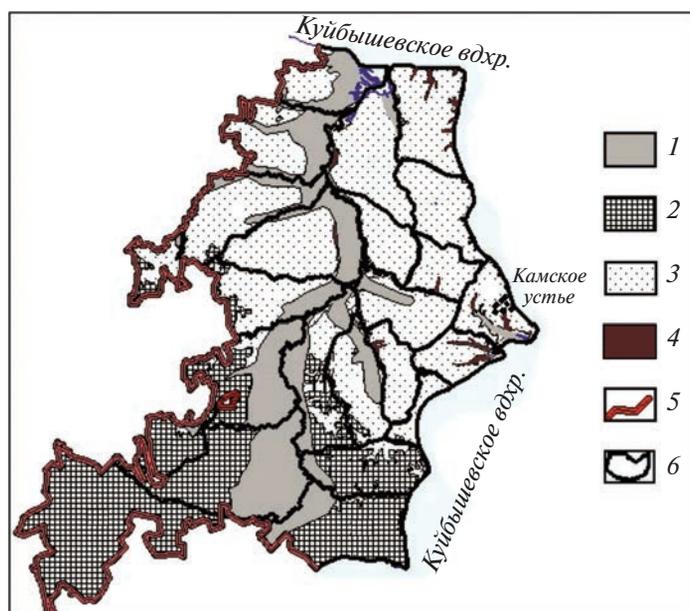


Рис. 1. Предволжский регион Татарстана. 1–4 приповерхностное развитие отложений: 1 – плиоцен-четвертичных, 2 – мезозойских, 3 – уржумско-вятских, 4 – казанских; 5 – граница РТ; 6 – контуры водосборных бассейнов.

зу, включая факторный и кластерный методы. На заключительном этапе построены гидрогеохимические карты в масштабе 1: 200 000 на указанные 7 водоносных комплексов

Наличие аналитических данных двух этапов площадного опробования (преимущественно периодов летней межени) предполагает рассмотрение характера и динамики изменения во времени состава ПВ. Это можно сделать на основе сопоставления разновременных данных по одним и тем же водопунктам, а также данных, осредненных по гидростратиграфическим уровням, по уравнениям:

$$\Delta C_1 = C_{t_2} - C_{t_1}, \quad (1)$$

$$\Delta C_2 = \Delta C_1 / C_{t_1} \times 100, \quad (2)$$

где C_{t_2} и C_{t_1} – концентрации компонентов (значения параметров) состава ПВ на периоды времени 2019–2020 гг. и 1996–2001 гг. соответственно; ΔC_1 и ΔC_2 – разница концентраций (значений) в мг/л (ммоль/л) и % соответственно.

Питьевое качество ПВ оценивалось на основе [13]. Для подтверждения некоторых выводов привлекались анализы водных вытяжек мезозойских пород, выполненные ранее [9]. Рассмотрение геохимии и условий формирования состава ПВ проведено по южной части Предволжья, примерно южнее широты пос. Камское Устье. Именно здесь развиты мезозойские отложения, и в полном стратиграфическом объеме представлено их пермское обрамление.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

ПВ в южной части Предволжского региона отличаются крайне высокой вариативностью (табл. 1).

Особенности изменения во времени некоторых показателей их состава отражены в табл. 2–3. В целом отмечается тенденция улучшения со временем качественных показателей ПВ, проявляющаяся и при анализе данных по одним и тем же водозаборным скважинам (62 объекта уровней P_{3t} , P_{2ur} и P_{2kz_2}). Это связано со снижением техногенного пресса, обусловленного прогрессирующим снижением деловой активности и продолжающейся депопуляцией изученной территории.

Качество рассматриваемых ПВ не всегда удовлетворяет питьевым стандартам. Доля некондиционных вод даже в самой верхней части разреза – на уровне меловых и татарских отложений – может достигать 40%, а на уровне верхне- и нижнеказанских комплексов – почти 100%. Основным параметром, лимитирующим питьевое использование ПВ, является жесткость. В родниковых водах повышенная жесткость иногда сопровождается сверхнормативными концентрациями нитратов. На отдельных участках последние достигают 929 мг/л. В большинстве случаев это отмечается в пределах населенных пунктов и на их окраинах. Максимально широкий спектр компонентов со сверхнормативными концентрациями характерен для вод казанских отложений. Здесь жесткость часто сопровождается повышенными значениями (в скобках коэффициенты превышения ПДК): минерализации (до 7.1), концентра-

Таблица 1. Значения важнейших интегральных показателей состава ПВ

Индекс комплекса	Кол-во проб	Минерализация расчетная (min-max), мг/л	Жесткость (min-max), ммоль/л	Преобладающий тип воды
N ₂ -Q	<u>25</u> 7	262–1304	3.2–15.7	<u>HCO₃/Mg-Ca</u> HCO ₃ -SO ₄ /Mg-Ca
K	<u>51</u> 8	325–1035	1.7–11.9	<u>HCO₃/Ca</u> SO ₄ -HCO ₃ /Mg-Ca
J	<u>153</u> 6	267–3398	1.5–26.3	<u>HCO₃/Mg-Ca</u> HCO ₃ -SO ₄ и SO ₄ / Mg-Ca-Na и Na
P _{3t}	<u>258</u> 25	237–2253	2.4–21.0	<u>HCO₃/Mg-Ca</u> HCO ₃ -SO ₄ /Ca-Mg-Na
P _{2ur}	<u>454</u> 81	374–3238	0.7–28.1	<u>HCO₃/Mg-Ca</u> HCO ₃ -SO ₄ и SO ₄ / Mg-Ca-Na и Na
P _{2kz₂}	<u>151</u> 23	531–7173	3.5–57.0	<u>HCO₃/Mg-Ca</u> SO ₄ /Ca, Mg-Ca и Na-Mg-Ca; Cl-SO ₄ /Ca-Mg-Na и Na-Mg-Ca
P _{2kz₁}	<u>29</u> 4	616–7173	6.4–57.0	<u>HCO₃/Mg-Ca</u> SO ₄ /Ca-Mg-Na и Na-Ca-Mg; Cl-SO ₄ /Ca-Mg-Na и Na-Mg-Ca

В числителе второго столбца – количество анализов 1996–2001 гг., в знаменателе – 2019–2020 гг.; в числителе последнего столбца преобладающий тип (типы) наименее минерализованных подземных вод, в знаменателе – наиболее минерализованных вод; типы воды – согласно [12].

ций SO₄³⁻ (8.2), (Na+K)⁺ (6), Sr (1.5), В (14), Fe (16) и некоторых др. компонентов. Такие воды иногда используются для хозяйственно-питьевого водоснабжения. NO₃⁻, Na⁺, В и Sr характеризуются санитарно-токсикологическим показателем вредности и в основном относятся ко второму классу опасности. Повышенные концентрации нитратов могут способствовать развитию рака желудка и заболеванию крови (метгемоглобинемия); бора – нарушению углеводного обмена и снижению репродуктивной функции; стронция – к поражению костного аппарата, натрия – к гипертонической болезни [6].

Высокая вариативность состава и качества ПВ, а также проявления латеральной и вертикальной гидрогеохимических зональностей определяются такими природными факторами, как интенсивность водообмена, минералого-геохимические особенности водовмещающих сред и характер питания. Раскрытие их роли будет проводиться на основе материала 1996–2001 гг., что связано с масштабностью опробования и комплексностью аналитических данных этого времени.

Снижение структурных поверхностей в южном и юго-западном направлениях определяет различия в условиях залегания основных гидро-

геологических подразделений. В северной части района первыми от поверхности залегают татарский и уржумский комплексы. В районе пос. Камское Устье в нижней части водораздельных склонов локально обнажается верхнеказанский комплекс. По мере движения в южном направлении пермские отложения последовательно перекрываются юрскими и меловыми образованиями, мощности которых постепенно увеличиваются. При этом площади приповерхностного развития пермских отложений постепенно сокращаются вплоть до полного их перекрытия более молодыми комплексами. Учитывая различие в строении пермских и мезозойских отложений (преобладание глин в составе последних), можно говорить о более затрудненном водообмене в комплексах мезозой. Это хорошо подтверждается данными по составу родниковых вод. В области развития мезозой они более жесткие и минерализованные, а также несколько обогащены бором по сравнению с ПВ вне этой области. Интерес представляет и повышенная кремнекислотность вод меловых отложений (табл. 4, 5).

Затрудненный характер водообмена определяет меньшую степень промытости мезозойских отложений в сравнении с пермскими, что отражается на минерализации ПВ. Ее росту могут спо-

Таблица 2. Изменения состава ПВ во времени по данным опробования одних и тех же родников

Индекс	Кол-во водопунктов	Минерализация, мг/л	Жесткость, ммоль/л	Нитраты, мг/л	Тенденция изменения качественных характеристик
K	3	$\frac{(-75) - (-14)}{(-40) \pm 31}$ (-31.6)	$\frac{(-0.9) - 0.21}{(-0.27) \pm 0.59}$ (-0.09)	$\frac{(-9) - 14.6}{2.5 \pm 11.8}$ 1.9	Неоднозначная
J	6	$\frac{(-234) - 96}{(-64) \pm 130}$ -25	$\frac{(-4) - 0.7}{(-1.1) \pm 1.9}$ (-0.3)	$\frac{(-38) - 28}{(-0.4) \pm 25.5}$ 5.9	Слабое улучшение
P _{3t}	18	$\frac{(-190) - 274}{7 + 114}$ (-21)	$\frac{(-2) - 4.6}{0.4 \pm 1.6}$ 0.06	$\frac{(-44) - 35}{(-6.4) \pm 19.7}$ (-1.4)	Неоднозначная
P _{2ur}	49	$\frac{(-521) - 507}{(-25) \pm 131}$ (-24.7)	$\frac{(-3.9) - 4.8}{0.04 \pm 1.4}$ (-0.03)	$\frac{(-189) - 62}{(-12) \pm 40}$ (-3.08)	Слабое улучшение
P _{2kz2}	3	$\frac{(-31) - 51}{9.9 \pm 40.6}$ 9.5	$\frac{0.05 - 0.99}{0.5 \pm 0.5}$ 0.39	$\frac{(-3.7) - 26.4}{7.1 \pm 16.7}$ -1.3	Неоднозначная

В первой строке данных – предельные значения, во второй – среднее ± стандартное отклонение, в третьей – медиана.

Таблица 3. Сопоставление разновременных средних значений интегральных показателей состава ПВ

Индекс	Тип водопунктов	Кол-во проб	Минерализация, мг/л	Жесткость, ммоль/л	Преобладающие типы воды
K	Родники	<u>44</u>	<u>617</u>	<u>6.66</u>	HCO ₃ /Ca и Mg–Ca
		8	584	5.56	
J	Родники	<u>113</u>	<u>684</u>	<u>7.54</u>	HCO ₃ / и SO ₄ –HCO ₃ /Mg–Ca
		5	609	6.89	
	Скваж.	<u>40</u>	<u>1234</u>	<u>7.55</u>	HCO ₃ и SO ₄ –HCO ₃ /Mg–Ca–Na
		1	839	7.38	
P _{3t}	Родники	<u>225</u>	<u>611</u>	<u>7.02</u>	HCO ₃ /Mg–Ca
		18	574	6.81	
	Скваж.	<u>33</u>	<u>773</u>	<u>7.28</u>	HCO ₃ /Mg–Ca и SO ₄ –HCO ₃ /Na–Mg–Ca и Mg–Ca–Na
		7	748	5.99	
P _{2ur}	Родники	<u>201</u>	<u>590</u>	<u>6.70</u>	HCO ₃ /Mg–Ca
		33	601	7.46	
	Скваж.	<u>253</u>	<u>903</u>	<u>7.50</u>	HCO ₃ /Mg–Ca; SO ₄ –HCO ₃ /Na–Mg–Ca и Mg–Ca–Na
		48	744	6.51	
P _{2kz2}	Родники	1	1243	12.87	HCO ₃ –SO ₄ /Na–Mg–Ca
		<u>150</u>	<u>1755</u>	<u>20.60</u>	
	Скваж.	23	1581	17.66	HCO ₃ , SO ₄ –HCO ₃ , HCO ₃ –SO ₄ , SO ₄ /Ca, Mg–Ca и Na–Mg–Ca
		<u>29</u>	<u>2763</u>	<u>32.73</u>	
P _{2kz1}	Скваж.	4	2590	27.32	HCO ₃ –SO ₄ , SO ₄ /Mg–Ca и Na–Mg–Ca

В числителе данные 1996–2001 гг., в знаменателе – 2019–2020 гг.

Таблица 4. Сопоставление составов родниковых вод на участках различного геологического строения

Индекс	Кол-во проб	Минерализация, мг/л	Жесткость, ммоль/л	Кол-во некондиционных проб и параметры	Формула ионного состава (по осредненным данным)
1	2	3	4	5	6
К	44	<u>341–1035</u> <u>617 ± 186</u> 593	<u>3.1–11.9</u> <u>6.66 ± 2.4</u> 6.50	23 (52%); Ж–1.6; реже NO ₃ –1.8, Si –1.1, В–6.8	<u>HCO₃80 SO₄13Cl4NO₃3</u> Ca64Mg22Na13
J	102	<u>403–1506</u> <u>703 ± 169</u> 683	<u>3.9–15.1</u> <u>7.76 ± 2.0</u> 7.47	65 (64%); Ж–1.9, реже В–6.5, редко NO ₃ –4.7	<u>HCO₃85 SO₄9Cl5NO₃2</u> Ca62Mg25Na13
P _{3t}	57	<u>391–1296</u> <u>683 ± 183</u> 657	<u>2.77–14.4</u> <u>7.64 ± 2.1</u> 7.35	35 (61%); Ж–2.0, реже В–2.8, редко NO ₃ –6.3	<u>HCO₃82 SO₄9Cl4NO₃4</u> Ca49Mg37Na14
P _{2ur}	8	<u>402–1787</u> <u>773 ± 443</u> 635	<u>4.2–19.8</u> <u>9.1 ± 4.9</u> 7.55	5 (63%); Ж–2.8, реже NO ₃ – до 13	<u>HCO₃70 NO₃15SO₄9Cl6</u> Ca58Mg32Na9
P _{3t}	121	<u>286–2253</u> <u>577 ± 188</u> 551	<u>2.4–20.97</u> <u>6.71 ± 1.9</u> 6.47	42 (35%); Ж–3, реже NO ₃ – 4.6	<u>HCO₃88 NO₃5 SO₄4Cl4</u> Ca54Mg36Na10
P _{2ur}	144	<u>374–1174</u> <u>573 ± 90.8</u> 564	<u>3.8–12.9</u> <u>6.47 ± 1.2</u> 6.51	37 (26%); Ж–1.8, редко NO ₃ –5.6	<u>HCO₃93 SO₄3Cl2NO₃2</u> Ca48Mg41Na11

В первых 4 строках приведены данные по области развития мезозойских отложений, в последних двух строках (выделены курсивом) – вне области развития мезозойских отложений; цифры в третьем и четвертом столбцах: предельные значения, среднее ± стандартное отклонение, медиана; в пятом столбце: Ж – жесткость, цифры после компонентов состава – степень превышения ПДК.

Таблица 5. Некоторые особенности состава родниковых вод на участках различного геологического строения (мг/л)

Индекс	Кол-во проб	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	(Na+K) ⁺	SiO ₂	B
К	44	<u>171–580</u> <u>375 ± 115</u> 393.6	<u>5.8–270</u> <u>47.2 ± 54</u> 27.5	<u>0.4–106.6</u> <u>10.8 ± 18.5</u> 3.8	<u>0–158.2</u> <u>23.1 ± 31.9</u> 14.3	<u>9.06–45.9</u> <u>27.9 ± 10.4</u> 29.5	<u>0.025–3.4</u> <u>0.34 ± 0.7</u> 0.12
J	102	<u>238–702</u> <u>463 ± 78</u> 460.6	<u>0.03–257</u> <u>37.8 ± 54</u> 19.0	<u>0.59–230.9</u> <u>14.4 ± 30.5</u> 3.7	<u>0.3–179.2</u> <u>27.2 ± 31.6</u> 20.4	<u>3.79–34.7</u> <u>13.6 ± 5.8</u> 12.35	<u>0.001–3.2</u> <u>0.20 ± 0.4</u> 0.1
P _{3t}	57	<u>269–568</u> <u>444.1 ± 70</u> 451.6	<u>1.2–282</u> <u>40.0 ± 59</u> 15.5	<u>0.59–109.1</u> <u>12.82 ± 23</u> 3.2	<u>0.46–94.5</u> <u>27.83 ± 25</u> 23.0	<u>2.9–22.7</u> <u>10.28 ± 3.9</u> 9.50	<u>0.001–1.4</u> <u>0.22 ± 0.3</u> 0.122
P _{2ur}	8	<u>281–525</u> <u>428.7 ± 86</u> 457.7	<u>2.3–129</u> <u>43.7 ± 54</u> 8.7	<u>0.77–108.8</u> <u>20.52 ± 37</u> 3.7	<u>2.3–90.2</u> <u>21.0 ± 28.7</u> 12.7	<u>11.5–19.3</u> <u>14.4 ± 2.9</u> 13.5	<u>0.01–0.15</u> <u>0.1 ± 0.04</u> 0.099
P _{3t}	121	<u>201–561</u> <u>396.2 ± 65</u> 396.5	<u>0.03–158</u> <u>12.4 ± 16</u> 7.8	<u>0.4–128.2</u> <u>9.47 ± 19.5</u> 2.8	<u>0.03–218.7</u> <u>17.18 ± 32</u> 9.1	<u>11.5–19.3</u> <u>14.4 ± 2.9</u> 13.5	<u>0.00–0.59</u> <u>0.07 ± 0.1</u> 0.05
P _{2ur}	144	<u>259–582</u> <u>411.8 ± 53</u> 414.9	<u>0.03–69</u> <u>10.3 ± 12</u> 6.6	<u>0.45–67.1</u> <u>4.31 ± 8.3</u> 1.7	<u>0–73.4</u> <u>18.7 ± 17.2</u> 13.0	<u>6.36–27.5</u> <u>12.92 ± 3.3</u> 12.5	<u>0.002–1.3</u> <u>0.1 ± 0.13</u> 0.067

Аналогично примечаниям к табл. 4.

собствовать и повышенная углекислотная агрессивность ПВ юрского комплекса (отражающаяся повышенными концентрациями гидрокарбонатов), определяющая более активное взаимодействие с водовмещающим минеральным матриксом, а также возможное сохранение в минералого-геохимическом комплексе мезозойского первичного морского ионно-солевого комплекса. Углекислотная агрессивность ПВ обычно определяется активностью углекислого газа. Повышенное парциальное давление последнего в разрезе юры весьма вероятно за счет его низкой проницаемости и обогащенности органическим веществом. Увеличение времени взаимодействия в системе “вода–порода” ведет и к некоторому накоплению в водах мезозойских отложений и бора, кларк которого в осадочных породах по А.П. Виноградову составляет 100 г/т. А повышенная кремнекислотность вод меловой части разреза определяется развитием здесь опок.

Данные табл. 4 и 5 наглядно иллюстрируют и роль характера питания ПВ. Родниковые воды в естественных условиях получают основное питание за счет инфильтрации атмосферных осадков, обычно имеющих $\text{SO}_4\text{—HCO}_3/\text{Na—Ca}$ состав со среднегодовой минерализацией не более 50 мг/л [5]. Другим источником питания могут являться воды смежных водоносных комплексов. Вне поля развития мезозойской толщи родниковые воды имеют атмосферное питание и минимальное время взаимодействия в системе “вода–порода”, определяемое частым чередованием проницаемых и слабопроницаемых пород при высокой степени расчлененности рельефа. Подтверждением этого являются практически идентичные составы и качество вод татарского и уржумского комплексов. Подобная картина отмечается и в других районах Предволжского региона [4]. В области развития мезозойского в формировании состава родниковых вод определенную роль начинают играть воды смежных, в первую очередь вышележащих, гидрогеологических подразделений. Именно с этим связаны здесь более высокая минерализация, жесткость и бороносность вод пермских отложений, в сравнении с таковыми вне этой области.

Вышеотмеченные гидрогеохимические особенности проявляются и при анализе скважинных материалов. Для получения корректных данных они сгруппированы по следующим глубинным интервалам установок фильтров (м): до 50, 50–100, 100–150, 150–200, 200–250, 250–300 (табл. 6–7, данные по казанским комплексам очень близки, подавляющая часть учтенных скважин находится в области транзита ПВ).

Эти таблицы наглядно отражают существенные различия в составах вод пермских и мезозойских отложений, а также довольно яркие прояв-

ления латеральной и вертикальной гидрогеохимической зональности.

Вне области развития мезозойских образований ПВ характеризуются относительно равномерным нарастанием минерализации и жесткости с глубиной. При этом гидрокарбонатный анионный состав постепенно через переходные подтипы сменяется сульфатным, катионный же состав преимущественно сохраняется постоянным – магниевый–кальциевый. Рост минерализации связан с увеличением концентраций, в первую очередь, сульфатов и компонентов жесткости. Хлориды и натрий обычно играют подчиненную роль. Существенное увеличение сульфатности вод отмечается с глубинного интервала 100 м. Параллельно идет снижение содержаний гидрокарбонатов. Данные особенности состава подземных вод обусловлены процессами выщелачивания карбонатных пород, которые с глубиной сменяются выщелачиванием и растворением сульфатных пород. Последнее может вызвать выпадение в осадок некоторого количества карбонатов кальция и магния, за счет пересыщения ПВ этими компонентами. Процессы гидролиза и катионного обмена, которые обычно переводят в растворы щелочные компоненты, играют подчиненную роль.

Существенно иная картина отмечается в области развития мезозойских отложений. Нарастание минерализации и жесткости с глубиной имеет нелинейный характер. Существенный рост первой, как и в вышеописанном случае, отмечается с глубинного уровня 100 м. Это нарастание в основном происходит за счет сульфатов и натрия, в меньшей степени хлоридов, а концентрации гидрокарбонатов начинают снижаться. Снижение отмечается и для параметра жесткости в глубинном интервале 100–150(200) м (за исключением казанских водоносных комплексов). На этом глубинном уровне в отдельных случаях возможно развитие содовых ПВ. Необходимо отметить и более высокий уровень минерализации и жесткости, а также более активное участие хлоридов и натрия в формировании составов ПВ в пермских отложениях, залегающих под мезозойской толщей, в сравнении с таковыми вне ее (табл. 8).

Данные гидрогеохимические особенности, в первую очередь, обусловлены более затрудненным водообменом, вероятно протекающим в более восстановительных условиях и на уровне юрского комплекса при повышенной парциальной активности CO_2 . Более длительное взаимодействие в системе “вода–порода” при преобладании в мезозойском разрезе терригенных пород способствует активному проявлению процессов гидролиза алюмосиликатных минералов, приводящих к выводу в раствор щелочных и щелочноземельных элементов. Параллельно с этим про-

Таблица 6. Интегральные показатели состава ПВ на различных глубинных уровнях в области развития мезозойских отложений

Индекс	Интерв. глубин, м	Кол-во проб	Минерализация, мг/л	Жесткость, ммоль/л	Кол-во некондиц. проб	Формула ионного состава (по осредненным данным)
К	До 50	4	670 ± 204 706	5.2 ± 1.39 5.24	4 (100%)	$\text{HCO}_3\text{81NO}_3\text{11SO}_4\text{6Cl}_2$ Ca46Na36Mg19
	50–100	1	716	4.57	0	$\text{HCO}_3\text{79SO}_4\text{15NO}_3\text{4Cl}_2$ Na49Ca37Mg14
J	До 50	17	951 ± 301 830	6.37 ± 2.1 6.73	16 (94%)	$\text{HCO}_3\text{73SO}_4\text{15Cl11NO}_3\text{2}$ Na48Ca31Mg21
	50–100	14	1183 ± 494 1000	9.47 ± 4.4 8.51	14 (100%)	$\text{HCO}_3\text{54SO}_4\text{34Cl11NO}_3\text{0}$ Na40Ca35Mg24
	100–150	12	1584 ± 835 1299	6.98 ± 7.0 5.07	12 (100%)	$\text{SO}_4\text{50HCO}_3\text{38Cl11NO}_3\text{0}$ Na68Ca19Mg13
P _{3t}	До 50	14	737 ± 159 677	7.08 ± 1.8 7.53	13 (93%)	$\text{HCO}_3\text{76SO}_4\text{14Cl6NO}_3\text{3}$ Ca41Mg33Na26
	50–100	12	$799,7 \pm 324$ 678,6	7.86 ± 2.9 7.41	12 (100%)	$\text{HCO}_3\text{71SO}_4\text{18Cl8NO}_3\text{3}$ Ca43Mg32Na25
	100–150	3	1090 ± 758 655	7.07 ± 1.2 7.75	3 (100%)	$\text{SO}_4\text{56HCO}_3\text{35Cl8NO}_3\text{1}$ Na53Ca26Mg21
P _{2ur}	До 50	60	832 ± 270 795	7.50 ± 2.1 7.14	57 (95%)	$\text{HCO}_3\text{69SO}_4\text{21Cl9NO}_3\text{0}$ Ca39Na31Mg29
	50–100	73	967 ± 461 821	7.88 ± 3.1 7.44	69 (95%)	$\text{HCO}_3\text{56SO}_4\text{30Cl12NO}_3\text{1}$ Na40Ca32Mg29
	100–150	35	1378 ± 713 1133	6.77 ± 2.8 6.80	34 (97%)	$\text{SO}_4\text{49HCO}_3\text{36Cl15NO}_3\text{0}$ Na65Ca19Mg17
	150–200	5	1848 ± 759 1539	11.3 ± 6.8 8.3	5 (100%)	$\text{SO}_4\text{67HCO}_3\text{20Cl13NO}_3\text{0}$ Na57Ca25Mg17
P _{2kz2}	До 50	4	1424 ± 586 1441	19.5 ± 8.9 19.87	4 (100%)	$\text{SO}_4\text{69HCO}_3\text{28Cl2NO}_3\text{1}$ Ca72Mg25Na2
	50–100	14	1570 ± 744 1628	16.4 ± 10 16.03	14 (100%)	$\text{SO}_4\text{71HCO}_3\text{26Cl3NO}_3\text{0}$ Ca62Na24Mg14
	100–150	2	4479 ± 3826	36.9 ± 28	2(100%)	$\text{SO}_4\text{78Cl17HCO}_3\text{5NO}_3\text{0}$ Na45Ca28Mg27
	150–200	7	3016 ± 799 3324	30.55 ± 20 42.56	7 (100%)	$\text{SO}_4\text{85HCO}_3\text{8Cl8NO}_3\text{0}$ Ca35Mg33Na32
	200–250	13	3572 ± 244 3523	46.4 ± 3.3 46.07	13(100%)	$\text{SO}_4\text{89Cl6HCO}_3\text{5NO}_3\text{0}$ Ca43Mg42Na15
250–300	11	3250 ± 259 3208	40.5 ± 5.7 41.6	11(100%)	$\text{SO}_4\text{87HCO}_3\text{7Cl6NO}_3\text{0}$ Ca45Mg37Na18	

В 4 и 5 столбцах: в числителе – среднее ± стандартное отклонение, в знаменателе – медиана.

исходит выщелачивание карбонатного вещества. Протеканию указанных процессов способствует и повышенная активность CO₂. Все это приводит к формированию гидрокарбонатных смешанных по катионному составу ПВ, что и отмечается в верхней части меловых и юрских отложений (до

глубинного уровня 50 м). Глубже за счет выщелачивания гипсов и сульфидных минералов возрастает содержание сульфатов, ПВ приобретают SO₄–HCO₃ и HCO₃–SO₄ составы. При этом их катионный состав сохраняется прежним – трехкомпонентным (часто при преобладании Na), но с

Таблица 7. Интегральные показатели состава ПВ на различных глубинных уровнях вне области развития мезозойских отложений

Индекс	Интер. глубин, м	Кол-во проб	Минерализация, мг/л	Жесткость, ммоль/л	Кол-во некондиц. проб	Формула ионного состава (по осредненным данным)
P _{3t}	До 50	3	522 ± 36 535	6.28 ± 0.2 6.19	0	$\text{HCO}_3\text{96SO}_4\text{1Cl11NO}_3\text{1}$ Mg52Ca41Na6
	50–100	1	733	9.48	1 (100%)	$\text{HCO}_3\text{83NO}_3\text{7SO}_4\text{5Cl5}$ Ca51Mg48Na0
P _{2ur}	До 50	16	621 ± 82 623	6.56 ± 1.8 7.05	15 (94%)	$\text{HCO}_3\text{89SO}_4\text{7Cl3NO}_3\text{2}$ Ca43Mg39Na17
	50–100	42	683 ± 149 665	7.53 ± 2.1 6.94	38 (90%)	$\text{HCO}_3\text{77SO}_4\text{15Cl5NO}_3\text{4}$ Ca44Mg40Na15
	100–150	3	1210 ± 722 836	8.79 ± 3.4 10.5	3 (100%)	$\text{SO}_4\text{66HCO}_3\text{31Cl2NO}_3\text{0}$ Na47Ca30Mg23
P _{2kz2}	До 50	12	959 ± 245 934	11.7 ± 2.9 11.37	12 (100%)	$\text{HCO}_3\text{58SO}_4\text{33Cl6NO}_3\text{3}$ Ca64Mg27Na9
	50–100	47	1383 ± 711 1081	17.4 ± 9.2 14.2	47 (100%)	$\text{SO}_4\text{60HCO}_3\text{36Cl2NO}_3\text{2}$ Ca66Mg25Na10
	100–150	12	1764 ± 885 1702	20.1 ± 12 22.31	12 (100%)	$\text{SO}_4\text{75HCO}_3\text{22Cl2NO}_3\text{1}$ Ca59Mg22Na19

Аналогично примечаниям к табл. 6.

глубины 100 м отмечается снижение жесткости, и катионный состав может стать натриевым.

Снижение жесткости фиксируется в водах как юрских, так и подстилающих их татарских и уржумских отложений. Параллельное нарастание содержания натрия и снижение жесткости с глубиной обусловлены продолжающимся активным гидролизом алюмосиликатов, высаливанием карбонатов кальция и магния, а также ионным обменом по схеме Гедройца (Ca и Mg раствора вытесняют поглощенный Na). Обогащение поглощенного комплекса натрием может быть следствием сохранения в юрских породах первичного морского ионно-солевого комплекса. Об этом может свидетельствовать и некоторая обогащенность вод юрского комплекса хлоридами (до 227 мг/л), которая является дополнительной характерной чертой этого гидростратиграфического уровня.

ПВ татарского и уржумского комплексов в области развития мезозойских отложений довольно сильно отличаются от вод этих же комплексов вне данной области. Их состав ближе к составу вод юрских отложений. Во многом это связано с влиянием питания, часть которого приходится на нисходящее перетекание из юрского комплекса.

С различной длительностью взаимодействия ПВ с вмещающим минеральным матриксом и влиянием характера питания связаны и особенности состава вод казанских комплексов. В области развития мезозойских отложений они являются более мине-

рализованными за счет практически всех макрокомпонентов. Важная особенность этих ПВ – сохранение преимущественно Mg–Ca катионного состава при подчиненной роли Na (за исключением участков проявления интенсивной восходящей фильтрации, проявляющейся в долинах относительно крупных рек). Это связано с преобладающим сульфатно-карбонатным составом водовмещающих пород при второстепенной роли глинистой составляющей (что определяет невысокую интенсивность процессов гидролиза и ионного обмена), а также ограниченностью питания из вышележащей части разреза.

Дополнительными особенностями состава ПВ в области развития мезозойских отложений являются несколько более высокие уровни концентраций железа, а также значений pH и окисляемости. Это связано с обогащенностью мезозойских органическим веществом. В целом оно должно обуславливать проявление относительно восстановительных условий, что благоприятствует накоплению и миграции закисного железа (до 4.1 мг/л в водах юры и 12.0 мг/л в ПВ подстилающих отложений). Также здесь проявлена тенденция к увеличению значений pH до глубинного уровня 150 м (до pH = 9.30). Щелочные условия способствуют осаждению карбонатов кальция и магния. Основной глубинный уровень снижения жесткости в области развития мезозойских отложений – как раз уровень 100–150 м.

Таблица 8. Некоторые особенности состава скважинных вод на участках различного геологического строения (мг/л)

Индекс	Интервал глубин, м	HCO_3^-	SO_4^{2-}	Cl^-	$(\text{Na}+\text{K})^+$	B
K	До 50	<u>402.7 ± 149.8</u> 353.9	<u>21.4 ± 19.3</u> 12.94	<u>6.96 ± 10.1</u> 2.08	<u>66.5 ± 30.2</u> 62.33	<u>0.52 ± 0.60</u> 0.33
	50–100	433.2	62.5	7.64	100.5	0.26
J	До 50	<u>545.8 ± 76.1</u> 524.8	<u>88.86 ± 96.3</u> 56.13	<u>42.77 ± 45.2</u> 20.88	<u>134.3 ± 126.8</u> 85.8	<u>1.23 ± 1.71</u> 0.5
	50–100	<u>520.8 ± 116.3</u> 533.9	<u>261.2 ± 400.9</u> 96.8	<u>63.6 ± 62.3</u> 49.5	<u>148.1 ± 99.1</u> 122.1	<u>0.77 ± 0.57</u> 0.73
	100–150	<u>503.1 ± 183.8</u> 546.1	<u>520.3 ± 724.6</u> 195.1	<u>85.1 ± 37.5</u> 88.2	<u>337.4 ± 214.5</u> 306.6	<u>2.18 ± 1.7</u> 2.23
P _{3t}	До 50	<u>447.7 ± 79.5</u> 445.4	<u>64.8 ± 76.2</u> 26.76	<u>21.8 ± 17.8</u> 17.8	<u>57.6 ± 57.1</u> 41.3	<u>0.52 ± 0.77</u> 0.32
	50–100	<u>455.0 ± 67.2</u> 472.2	<u>92.2 ± 213.9</u> 17.2	<u>29.3 ± 38.9</u> 19.0	<u>60.6 ± 74.9</u> 31.6	<u>0.59 ± 0.47</u> 0.54
	100–150	<u>319.3 ± 155.9</u> 329.5	<u>406.8 ± 603.4</u> 108.3	<u>43.9 ± 44.5</u> 39.76	<u>183.8 ± 287.9</u> 29.9	<u>0.89 ± 0.5</u> 0.78
P _{2ur}	До 50	<u>460.2 ± 67.7</u> 457.7	<u>107.5 ± 165.6</u> 54.5	<u>33.06 ± 40.9</u> 21.9	<u>78.3 ± 85.4</u> 55.0	<u>0.56 ± 0.85</u> 0.35
	50–100	<u>449.9 ± 102.5</u> 476	<u>188.0 ± 342.7</u> 74.52	<u>56.5 ± 85.2</u> 24.26	<u>119.3 ± 140.5</u> 71.3	<u>1.13 ± 1.8</u> 0.44
	100–150	<u>418.3 ± 156.6</u> 457.5	<u>452.2 ± 563.3</u> 164.52	<u>99.8 ± 97.0</u> 90.3	<u>284.1 ± 218.9</u> 220.6	<u>2.3 ± 2.5</u> 1.44
	150–200	<u>323.4 ± 131.4</u> 323.4	<u>851.1 ± 692.5</u> 634.0	<u>125.2 ± 71.9</u> 133.8	<u>350.8 ± 131.8</u> 344.5	<u>2.2 ± 1.5</u> 1.45
P _{2kz₂}	До 50	<u>347.7 ± 63.4</u> 347.7	<u>658.3 ± 486.4</u> 658.6	<u>16.3 ± 7.5</u> 19.65	<u>9.9 ± 6.6</u> 12.75	<u>0.22 ± 0.16</u> 0.26
	50–100	<u>351.4 ± 92.0</u> 378.3	<u>745.8 ± 584.4</u> 811.3	<u>20.6 ± 30.3</u> 4.9	<u>124.2 ± 167.1</u> 55.15	<u>0.78 ± 1.5</u> 0.19
	100–150	222.73 ± 21.6	2543.0 ± 2162	398.6 ± 516	708.5 ± 707.8	0.54 ± 0.51
	150–200	<u>207.5 ± 84.8</u> 158.65	<u>1840.5 ± 751</u> 2160	<u>121.2 ± 49.7</u> 100.6	<u>336.5 ± 188.8</u> 279.0	<u>2.38 ± 1.6</u> 2.40
	200–250	<u>176.5 ± 14.2</u> 177.0	<u>2331.0 ± 145</u> 2284.6	<u>110.2 ± 49.8</u> 100.6	<u>188.0 ± 78.7</u> 172.0	<u>2.46 ± 0.98</u> 2.40
	250–300	<u>214.7 ± 15.9</u> 213.57	<u>2046.0 ± 202</u> 2013.5	<u>106.8 ± 14.5</u> 109.91	<u>200.1 ± 91.7</u> 178.0	<u>2.08 ± 0.8</u> 2.18
P _{3t}	До 50	<u>390.5 ± 28.0</u> 384.4	<u>4.7 ± 1.0</u> 4.16	<u>1.8 ± 0.8</u> 1.32	<u>10.0 ± 11.5</u> 7.36	<u>0.08 ± 0.07</u> 0.05
	50–100	482.1	21.6	17.04	0.92	0.11
P _{2ur}	До 50	<u>429.7 ± 52.5</u> 441.7	<u>25.1 ± 21.3</u> 20.05	<u>7.6 ± 5.7</u> 7.19	<u>31.6 ± 36.4</u> 23.23	<u>0.35 ± 0.5</u> 0.095
	50–100	<u>415.9 ± 56.7</u> 422.8	<u>63.8 ± 96.8</u> 27.34	<u>15.1 ± 16.2</u> 7.79	<u>31.8 ± 34.3</u> 20.92	<u>2.1 ± 11.3</u> 0.15
	100–150	<u>320.8 ± 86.7</u> 303.4	<u>535.2 ± 567.8</u> 312.6	<u>11.8 ± 10.5</u> 13.09	<u>182.9 ± 204.3</u> 112.7	<u>0.60 ± 0.56</u> 0.36
P _{2kz₂}	До 50	<u>449.7 ± 53.8</u> 439.3	<u>203.1 ± 173.9</u> 111.9	<u>28.1 ± 36.4</u> 11.89	<u>25.4 ± 25.5</u> 17.5	<u>0.1 ± 0.14</u> 0.025
	50–100	<u>422.4 ± 118.4</u> 445.2	<u>553.7 ± 597</u> 394.4	<u>14.9 ± 19.1</u> 8.39	<u>42.2 ± 54.8</u> 23.69	<u>1.75 ± 10.6</u> 0.12
	100–150	<u>339.1 ± 99.0</u> 359.3	<u>896.2 ± 676.8</u> 837.0	<u>19.2 ± 17.6</u> 13.78	<u>113.9 ± 162.3</u> 84.0	<u>0.20 ± 0.25</u> 0.13

Данные по первым пяти комплексам относятся к области развития мезозойских отложений, по трем последним (выделены курсивом) – вне этой области; в числителе – среднее ± стандартное отклонение, в знаменателе – медиана.

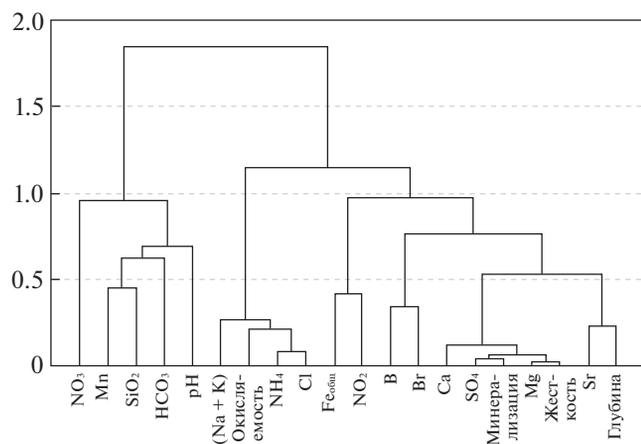


Рис. 2. Кластер-диаграмма связей компонентов и параметров состава ПВ, осредненных по глубинным интервалам всех рассматриваемых гидрогеологических подразделений (34 выборки, мера связи – коэффициент корреляции Пирсона ($1-r$)).

Интенсивность водообмена снижается с глубиной. С ее ростом происходит увеличение минерализации, в первую очередь, за счет сульфатов кальция и магния (рис. 2). С глубинным параметром значимо положительно коррелируют и концентрации Sr, Br, B и Fe (компоненты перечислены в порядке уменьшения значений коэффициентов парной корреляции, $r = 0.38-0.77$), а отрицательная корреляция проявлена у HCO_3 , SiO_2 и Mn ($r = -(0.46-0.77)$), все остальные микрокомпоненты ведут себя индифферентно). Максимальная активность последних обычно отмечается на глубинах до 100 м. Это характерно и для нитратов. Особый интерес представляет кластер, образованный хлоридами, щелочными компонентами и органическим веществом. Эти компоненты тесно скоррелированы друг с другом ($r = 0.73-0.92$), при этом связь с глубинным фактором незначима ($r = 0.0-0.34$). Данный кластер в какой-то степени может отражать наличие первичного морского ионно-солевого комплекса в составе водовмещающих пород. Это весьма вероятно для образований юрского возраста на участках их перекрытия меловыми отложениями.

В юрском комплексе минерализация с глубиной увеличивается прежде всего за счет сульфатов, хлоридов и натрия. Жесткость с глубиной снижается. Из микрокомпонентов, концентрации которых часто превышают нормативные значения для питьевых вод, бор повышенную активность проявляет в содовых водах, а железо на глубинных уровнях до 100 м. Интересным является нарастание окисляемости и концентраций нефтепродуктов с глубиной ($r = 0.26$ и 0.52). Это может свидетельствовать о возможности локального обогащения органическим веществом ПВ в отдельных частях разреза юрских отложений, кон-

центрации которого могут превысить минимальное значение для соответствующего типа минеральных лечебных вод. Так, минеральные воды торговой марки “Волжанка” приурочены к стратиграфическому уровню волжских отложений, а воды марки “Тарханская-3” – к батским. Содержание органического углерода в первом типе воды составляет 5–10, а во втором – 5–8 мг/л [11]. При этом водорастворенное органическое вещество может иметь двойственную природу – вещество непосредственно мезозойских отложений (фаунистические и битуминозные органические остатки “сланцевой плиты”, залегающей в основании волжских отложений, и поровые растворы келловейских глин для “Волжанки” [11]), а также вещество относительно глубинных углеводородсодержащих флюидов по [10], сформировавших битумные залежи в пермских отложениях Предволжского региона, и, по устному сообщению Э.А. Королева, фиксируемых в виде жидкой нефти в центральных частях баритовых конкреций в келловейских глинах. Органическое вещество битумных залежей по Р.Л. Ибрагимову как раз и ответственно за обогащение им ПВ в районе Тарханского месторождения [7]. Это предположение базируется на наличии в ЮВ части Предволжского региона 12 битумопроявлений в верхнеказанских карбонатных породах [3], одно из которых непосредственно соседствует с этим месторождением минеральных вод.

Дополнительно о слабой промытости мезозойских отложений и их обогащенности органическим веществом могут свидетельствовать данные водных вытяжек [9]. Вытяжки готовились на основе дистиллированной и талой снеговой воды (36 проб с основных разностей пород). Максимальные значения минерализации (до 931 мг/л) и окисляемости (до 9.0 мг O_2 /л) приходятся на глины волжского (J_3v) и готеривского (K_{1g}) ярусов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Комплекс мезозойских отложений, сложенный преимущественно морскими глинами, характеризуется весьма своеобразными гидрогеохимическими и гидрогеодинамическими условиями. Совместно они определяют крайне неблагоприятные гидрогеоэкологические условия довольно обширной территории. Маломощные прослои водопроницаемых пород в мезозойском глинистом матриксе обуславливают значительные трудности в перехвате подземных вод для организации централизованного хозяйственно-питьевого водоснабжения местного населения. На это накладывается неблагоприятное качество значительного объема ПВ. Доля некондиционных в питьевом отношении родниковых вод превышает 50%, а скважинных вод составляет не менее 90%.

До глубинного уровня 100 м основной параметр, лимитирующий питьевое использование, — жесткость. Она часто сопровождается сверхнормативными концентрациями железа, марганца, бора, к которым в районах населенных пунктов добавляются нитраты. С глубинного интервала 100 м практически по всему разрезу как в мезозойских отложениях, так и в подстилающих их пермских образованиях жесткость за счет высаливания карбонатов кальция и магния снижается, при этом ПВ могут приобрести натриевый катионный состав, а содержания натрия превысить ПДК. Параллельно с этим происходит значительный рост концентраций бора, с частым сохранением сверхнормативных концентраций железа и минерализации более 1 г/л.

В крайней юго-западной части под комплексом мезозойских ПВ отличаются и повышенными относительно питьевого стандарта концентрациями сульфатов, стронция и брома. Общий повышенный уровень минерализации ПВ мезозойских отложений (за счет содержания практически всех анализировавшихся компонентов) в сравнении с водами пермских образований вне области развития мезозойских ПВ определяется прежде всего более длительным взаимодействием в системе “вода-порода” в условиях более высокого парциального давления углекислого газа и более низких значений окислительно-восстановительного потенциала, а также за счет особенностей состава мезозойских образований (обогащенность органическим веществом, высоковероятное сохранение части первичного морского ионно-солевого комплекса, наличие карбонатных и сульфатных минеральных выделений; одновременное проявление процессов гидролиза, выщелачивания, высаливания и ионного обмена).

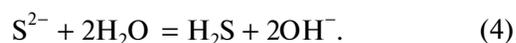
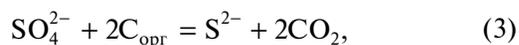
Охарактеризованная недостаточно благоприятная гидрогеоэкологическая обстановка определяет целесообразность проведения в регионе специализированных медико-экологических исследований. Проблемы качества питьевого водоснабжения в какой-то степени могут определять депопуляцию изученной территории, что обуславливает снижение техногенного пресса на окружающую среду и проявление тенденции некоторого улучшения качественных показателей пресных подземных вод за последние 20–25 лет.

Мезозойские отложения оказывают весьма существенное влияние на геохимию ПВ, локализованных как в них самих, так и в подстилающих пермских отложениях. В свою очередь, эта геохимия во многом определяет процессы вторичного минералообразования и зависит от них. Источником вещества для многих конкреций, локальных зон проявления сульфидной, кремнистой и карбонатной минерализации ($\text{Fe}(\text{OH})_3$, Fe_2S , CaCO_3 , $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$, SiO_2) может служить веще-

ство пород рассматриваемой части разреза, выщелоченное подземными водами в его верхней части и отложенное в более нижней. В областях проявления нисходящей фильтрации (перетекания) начальным глубинным уровнем отчетливо проявленного высаливания можно считать уровень 100 м. При этом максимально контрастно солеотложение проявлено в области развития мезозойских отложений, в первую очередь в разрезе юры.

Особенности состава ПВ мезозойских отложений позволяют считать их перспективными не только в плане выявления новых месторождений минеральных лечебных вод, обогащенных органическим веществом, но и вод с повышенными содержаниями кремниевой кислоты (в разрезе меловых отложений); а также вод, обогащенных железом (в составе юрского комплекса), сероводородом (в составе верхнеказанского комплекса) и минеральных вод группы “без специфических компонентов и свойств” по [8].

Известные максимальные содержания кремниевой кислоты в виде SiO_2 составляют 45.9 мг/л (см. табл. 7). По устным данным Э.А. Королева и Р.Х. Зайнуллина в нижней части обрывистых склонов правобережья Волги, сложенных юрскими отложениями, фиксируются родники, на выходе которых отмечаются многочисленные бурые охры гидроокислов железа. На Тарханской площади в 1955 г. пласт верхнеказанских битумоносных доломитов мощностью 3–6 м был испытан, и в результате получен приток сероводородной воды с пленкой битума [3]. Кроме этого, в районе с. Сюкеево (правобережье Волги в 18 км юго-западнее пос. Камское Устье) еще в XIX в. использовались сероводородные источники, формирование которых связывают с наличием битумной залежи в верхнеказанских доломитах [7]. Источником сероводорода являются сульфат-ионы, восстановление которых может происходить по следующей схеме [1]:



При этом возможно существенное изменение Eh и pH условий, которое может определить выпадение в осадок сульфидов Fe, Pb, Cu и др. халькофильных элементов, а также осаждение карбонатов Ca и Mg.

ПВ рассмотренного комплекса мезозойских и пермских отложений во многих случаях могут представлять собой минеральные лечебные воды “без специфических компонентов и свойств”. Так, на Тарханском месторождении три пространственно сближенные скважины captируют воды трех типов [11]. Скважина № 1 глубиной 36.4 м вскрывает $\text{SO}_4\text{—HCO}_3/\text{Na—Mg—Ca}$ воды с минерализацией 1.2–1.6 г/л в песчаниках волжского

водоносного горизонта (J_3v). Эти воды близки к водам Кисловодского типа (если не учитывать CO_2). Скважина № 3 глубиной 125 м вскрывает водоносный горизонт песчаников батского яруса (J_2bt), где развиты $SO_4-HCO_3/Mg-Ca-Na$ воды с минерализацией 0.8–1.1 г/л и повышенным содержанием органических веществ (аналог “Волжанки”). Скважина № 4 имеет глубину 150 м. Она вскрывает отложения татарского комплекса (P_3t). Перехватываемые скважиной воды имеют HCO_3-SO_4/Na состав и минерализацию 1.3–2.6 г/л [7, 11]. Все три вида минеральных лечебных вод пригодны для лечения заболеваний желудочно-кишечного тракта и обмена веществ, при этом воды в скважинах 1 и 4 по существу являются водами “без специфических компонентов и свойств”. Приведенные особенности состава вод различных водоносных горизонтов Тарханского месторождения являются дополнительным подтверждением вышеописанной вертикальной гидрогеохимической зональности в области развития мезозойских отложений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Всеволожский В.А.* Основы гидрогеологии. 2-изд., перераб. и доп. М.: Изд-во МГУ, 2007. 448 с.
2. Геологические памятники природы Республики Татарстан / Научн. ред. В.В. Силантьев. Казань: Акварель-Арт, 2007. 296 с.
3. Геология и освоение залежей природных битумов Республики Татарстан / Под ред. Р.С. Хисамова. Казань: Изд-во “Фэн”, 2007. 295 с.
4. Геология Приказанского района. Путеводитель по полигонам учебных геологических практики / Научн. ред. А.И. Шевелев. Казань: ЗАО “Новое знание”, 2007. 208 с.
5. Государственный доклад о состоянии природных ресурсов и об охране окружающей среды Республики Татарстан в 2021 г. Казань, 2022. URL: https://eco.tatarstan.ru/rus/file/pub/pub_3288791.pdf (дата обращения 02.09.2022).
6. *Зекцер И.С.* Подземные воды как компонент окружающей среды. М.: Научный мир, 2001. 328 с.
7. *Ибрагимов Р.Л., Бердников Т.Г., Павленко Н.К.* Перспективы поиска и особенности формирования минеральных вод в Тетюшском районе Республики Татарстан // Георесурсы. 2013. № 1 (51). С. 40–43.
8. *Иванов В.В., Невраев Г.А.* Классификация подземных минеральных вод. М.: Недра, 1964. 168 с.
9. *Калкаманова З.Г., Мусин Р.Х.* Литофациальные комплексы и геохимия подземных вод верхней части разреза Республики Татарстан // Современные проблемы гидрогеологии, инженерной геологии и гидрогеоэкологии Евразии: матер. Всерос. конф. с межд. участием. Томск: Изд-во ТПУ, 2015. С. 420–424.
10. *Королев Э.А., Морозов В.П., Леонова Л.В.* Литогенетические маркеры путей миграции углеводородсодержащих флюидов в зоне Волжского разлома на территории Республики Татарстан // Учен. Зап. Казанск. ун-та. Сер. Естеств. науки. 2011. Т. 153, кн. 4. С. 199–210.
11. *Курочкин В.Ю., Федоров А.А., Хорошавина Е.И., Бердников Т.Г., Ибрагимов Р.Л.* Минеральные воды Тарханского месторождения с. Большие Тарханы Тетюшского муниципального района Республики Татарстан // Курортная медицина. 2019. № 4. С. 10–17.
12. Отраслевой стандарт. Воды подземные. Классификация по химическому составу и температуре. М.: ВСЕГИНГЕО, 1986. 12 с.
13. СанПиН 1.2.3685-21 “Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания”.
14. Сводная геологическая карта доплейстоценовых отложений Республики Татарстан масштаба 1:200000. Пояснительная записка. Казань: Изд-во “Арника”, 1997. 118 с.
15. *Korolev E.A., Eskin A.A., Korolev A.E. et al.* Oil shale of the Middle Volga region: Composition, structure, energy properties // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, 2021, 808 (1), 012025.

GEOCHEMISTRY AND FORMATION CONDITIONS OF GROUNDWATER COMPOSITION IN THE AREA OF MESOZOIC SEDIMENTARY COVER IN TATARSTAN

R. Kh. Musin^{a,#}, A. D. Khamitov^{a,##}, and Z. G. Kalkamanova^{a,###}

^aKazan Federal University (KFU),
ul. Kremlyovskaya 18, Kazan, 420008 Russia

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

^{##}E-mail: khamitov07.03@gmail.com

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

Mesozoic sediments cover an area of 2870 km². Mesozoic sedimentary rocks are located in the southwestern part of the Republic of Tatarstan. A thick sequence (up to 390 m) are composed of clay with thin (up to 1 m) layers of sandstone and marl. Permian polygenic sulfate-carbonate-terrigenous deposits underlie the Mesozoic massif. They are exposed in the north of the Mesozoic sediment area. The studied area (~5000 km²) is used for farming. There are no large settlements or industrial enterprises there. The paper considers the specific features of Mesozoic and Permian groundwater composition. There is a trend to improving the groundwater quality with time. The reason of this positive trend is a decreasing technogenic impact and depopulation

of the territory. The lateral and vertical hydrogeochemical stratification is identified and characterized. Clay predominating in the massif appears to be the reason for the decreasing intensity of water exchange. Hydrolysis, cation exchange and leaching of carbonate and sulfate minerals add to this trend. The groundwater composition varies widely due to these processes and control specific mineralogical and geochemical features of Mesozoic massif (the saturation of organic substance, the presence of opoques, the primary marine ionic-salt compositions in local areas). Groundwater is more mineralized, with a large amount of organic substance, silicic acid, iron, boron and other micro-components in the area of Mesozoic sediment. The groundwater mineralization increases non-linearly to 6.1 g/l (mainly due to sulfates, chlorides and sodium), and the hardness increases to 50.6 mmol/l in the geological section of this area (up to a depth of occurrence 300 m) in areas with downward filtration. The water hardness decreases to 1.5–3.9 mmol/l at depths of 100–150 m (up to 200 m) in large areas. Vertical zonality (up to a depth of 150 m) is determined mainly by the leaching processes of carbonate and sulfate rocks outside the Mesozoic development area. Mineralization increases almost according to the linear law to 3.5 g/l (mainly due to sulfates, calcium and magnesium), and hardness – up to 37.7 mmol/l here.

The balneological properties of water are determined by the increased contents of organic substances, silicic acid, iron, hydrogen sulfide, as well as waters of the group “without specific components and properties”.

Keywords: *factors and processes of groundwater composition formation, water quality, precipitation of salts, mineral healing water*

REFERENCES

1. Vsevolozhskii, V.A. *Osnovy gidrogeologii* [Fundamentals of hydrogeology]. 2nd edition, Moscow, MGU Publ., 2007, 448 p. (in Russian)
2. *Geologicheskie pamyatniki prirody Respubliki Tatarstan* [Geological natural monuments of the Republic of Tatarstan]. V.V. Silant'ev, Ed., Kazan', Akvarel'-Art Publ., 2007, 296 p. (in Russian)
3. *Geologiya i osvoenie zalezhei prirodnykh bitumov Respubliki Tatarstan* [Geology and development of natural bitumen deposits in the Republic of Tatarstan]. R.S. Khisamova, Ed., Kazan', Fen Publ., 2007, 295 p. (in Russian)
4. *Geologiya Prikazanskogo raiona. Putevoditel' po poligonam uchebnykh geologicheskikh praktik* [Geology of the Kazan region. Guide to the test plots of educational geological practices]. A.I. Shevelev, Ed., Kazan', ZAO “Novoe znanie” Publ., 2007, 208 p. (in Russian)
5. *Gosudarstvennyi doklad o sostoyanii prirodnykh resursov i ob okhrane okruzhayushchei sredy Respubliki Tatarstan v 2021 g* [State report about the state of natural resources and environmental protection in the Republic of Tatarstan in 2021]. Kazan', 2022. Available at: https://eco.tatarstan.ru/rus/file/pub/pub_3288791.pdf (accessed 02.09.2022). (in Russian)
6. Zektser, I.S. *Podzemnye vody kak komponent okruzhayushchei sredy* [Groundwater as a component of the environment]. Moscow, Nauchnyi mir Publ., 2001, 328 p. (in Russian)
7. Ibragimov, R.L., Berdnikov, T.G., Pavlenko, N.K. *Perspektivy poiska i osobennosti formirovaniya mineral'nykh vod v Tetyushskom raione Respubliki Tatarstan* [Prospects for the search and features of the formation of mineral waters in the Tetyushsky district of the Republic of Tatarstan]. *Georesursy*, 2013, no. 1 (51), pp. 40–43. (in Russian)
8. Ivanov, V.V., Nevraev, G.A. *Klassifikatsiya podzemnykh mineral'nykh vod* [Classification of underground mineral waters]. Moscow, Nedra Publ., 1964, 168 p. (in Russian)
9. Kalkamanova, Z.G., Musin, R.Kh. *Litofatsial'nye komplekсы i geokhimiya podzemnykh vod verkhnei chasti razreza Respubliki Tatarstan* [Lithofacial complexes and geochemistry of groundwater in the upper part of the section of the Republic of Tatarstan]. *Sovremennye problemy gidrogeologii, inzhenernoi geologii i gidrogeologii Evrazii: Materialy Vseros. konf. s mezhd. uchastiem* [All-Russian conference with international participation]. Tomsk, TPU Publ., 2015, pp. 420–424. (in Russian)
10. Korolev, E.A., Morozov, V.P., Leonova, L.V. *Litogeneticheskie markery putei migratsii uglevodorodsoderzhashchikh flyuidov v zone Volzhskogo razloma na territorii Respubliki Tatarstan* [Lithogenetic markers of migration routes of hydrocarbon-containing fluids in the Volga fault zone in the territory of the Republic of Tatarstan]. *Uchen. Zap. Kazansk. un-ta. Ser. Estestv. Nauki*, 2011, vol. 153, book 4, pp. 199–210. (in Russian)
11. Kurochkin, V.Yu., Fedorov, A.A., Khoroshavina, E.I., Berdnikov, T.G., Ibragimov, R.L. *Mineral'nye vody Tarkhanskogo mestorozhdeniya s. Bol'shie Tarkhany Tetyushskogo munitsipal'nogo raiona Respubliki Tatarstan* [Mineral waters of the Tarkhansky deposit in the village of Bolshye Tarkhany, Tetyushsky municipal district of the Republic of Tatarstan]. *Kurortnaya meditsina*, 2019, no. 4, pp. 10–17. (in Russian)
12. *Otraslevoi standart. Vody podzemnye. Klassifikatsiya po khimicheskomu sostavu i temperature* [Industry standard. Groundwater. Classification by chemical composition and temperature]. Moscow, VSEGINGEO Publ., 1986, 12 p. (in Russian)
13. SaNPIN 1.2.3685-21 “*Gigienicheskie normativy i trebovaniya k obespecheniyu bezopasnosti (ili) bezvrednosti dlya cheloveka faktorov sredy obitaniya*” [Hygienic standards and requirements for ensuring the safety and (or) harmlessness of environmental factors for humans]. (in Russian)
14. *Svodnaya geologicheskaya karta dopleistotsenovykh otlozhenii Respubliki Tatarstan mashtaba 1 : 200000* [Summary geological map of pre-Pleistocene deposits of the Republic of Tatarstan on a scale of 1 : 200000]. *Poyasnitel'naya zapiska*. Kazan', Izd-vo “Arnika”, 1997, 118 p. (in Russian)
15. Korolev, E.A., Eskin, A.A., Korolev, A.E. et al. Oil shale of the Middle Volga region: Composition, structure, energy properties. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, no. 808 (1), 012025.

ЗАГРЯЗНЕНИЕ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

УДК 637:627.157:002

ОЦЕНКА ЗАГРЯЗНЕНИЯ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ МАЛЫХ РЕК ВЛАДИМИРСКОЙ ОБЛАСТИ

© 2023 г. С. М. Чеснокова^{1,*}, О. В. Савельев^{1,**}

¹Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых (ВлГУ), ул. Горького, 87, Владимир, 600000 Россия

*E-mail: chesnokova.chemist@mail.ru

**E-mail: olegator86@bk.ru

Поступила в редакцию 25.12.2022 г.

После доработки 24.01.2023 г.

Принята к публикации 13.02.2023 г.

Представлены результаты оценки уровня загрязнения донных отложений четырех малых рек Владимирской обл. тяжелыми металлами (ТМ) и фосфатами. По величинам коэффициентов концентрации ТМ, характеризующих уровень концентрирования (аномальности) элементов в донных отложениях относительно их фонового содержания в регионе, выявлены зоны техногенных полиэлементных геохимических аномалий в руслах всех исследованных водотоков и их структура. Установлено, что приоритетными металлами техногенных геохимических аномалий в донных осадках являются Fe, Pb, Co, Cu, Zn, Cr, Mn. Максимальные уровни загрязнения донных отложений указанными металлами характерны для зон влияния стоков с территорий коллективных садов (СНТ), животноводческих комплексов, крупных промышленных городов и сельских поселений. По значениям суммарного показателя загрязнения (Z_c), отражающего аддитивное превышение фонового содержания группой ТМ, входящих в состав техногенных геохимических аномалий, исследованные водотоки расположились в ряд: р. Содышка > р. Каменка > р. Рпень > р. Илевна, по содержанию фосфатов: р. Содышка > р. Рпень > р. Каменка > р. Илевна. Изучены корреляционные зависимости между компонентами донных отложений. Проведена оценка усредненной нагрузки на водотоки ТМ и фосфатов.

Ключевые слова: малые реки, донные отложения, загрязнение, полиметалльные геохимические аномалии, фосфаты, усредненная антропогенная нагрузка

DOI: 10.31857/S0869780923020030, EDN: TVWGQT

ВВЕДЕНИЕ

Малые реки, составляющие значительную долю гидрографической сети Владимирского региона, являются основными приемниками сточных вод предприятий промышленности и сельского хозяйства, поверхностного стока с территорий городских и сельских поселений, сельхозугодий, промплощадок, полигонов сельскохозяйственных и промышленных отходов. Указанные стоки загрязнены соединениями биогенных элементов, тяжелыми металлами (ТМ), нефтепродуктами, поверхностно-активными веществами, пестицидами, органическими веществами природного и антропогенного происхождения, взвешенными частицами, что вызывает эвтрофикацию малых рек и заиливание их русел [1, 3, 8].

Установлено, что в результате процессов седиментации и трансседиментации взвешенных веществ аллохтонного и автохтонного происхождения в руслах малых рек формируются донные отложения, состав которых, как правило, отражает

специфику хозяйственного использования водосборных территорий [5, 12].

Состав донных отложений стабильнее по сравнению с составом водной среды, мониторинг их состава менее трудоемок и экономически более целесообразен, чем ежегодное проведение сезонной оценки гидроэкосистемы по гидрохимическим и гидробиологическим показателям. Исходя из этого, донные осадки в настоящее время многими авторами рассматриваются как индикаторы экологического состояния водных объектов и для оценки техногенной нагрузки на гидроэкосистему [4, 10, 12].

Наиболее опасными компонентами донных отложений поверхностных вод являются ТМ и фосфаты, так как при увеличении в воде общей концентрации растворимых солей (ионной силы), изменении окислительно-восстановительных и кислотно-щелочных условий в водотоке возрастает их поток в водную фазу, что приводит к токсификации и эвтрофикации гидроэко-

стем и гибели наиболее чувствительной гидробиоты [10].

Цель работы – исследование уровня загрязнения донных отложений 4-х малых рек Владимирской обл. ТМ, фосфат-ионами; оценка техногенных геохимических аномалий ТМ в донных отложениях водотоков и антропогенной нагрузки на водотоки.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объекты исследования – малые водотоки бассейнов рек Клязьма (Содышка, Рпень, Каменка) и Ока (Илевна).

Указанные водотоки испытывают влияние как крупных стационарных, так и рассеянных источников загрязнения, характеризуются существенным различием площадей водосборных территорий, уровнем урбанизации и спецификой хозяйственного использования водосборных территорий.

Илевна – левый приток р. Ока, длина 40 км, площадь водосбора 861 км², протекает по территории Муромского района Владимирской обл. Бассейн реки полностью располагается на территории Муромского Предочья – самой распаханной части Мещерской Провинции подтайги Русской равнины, с выраженной правой асимметрией (правые притоки обширнее и многоводнее). Верхняя часть водосборной территории практически полностью распахана, естественные насаждения сведены к минимуму, остальная часть бассейна расположена в более лесистой местности со слабой заселенностью. Правобережная часть бассейна испытывает антропогенную нагрузку за счет большей плотности населения и большей интенсивности освоения территории, а левобережная часть – за счет промышленных предприятий округа Муром и мкр. Вербовский и населенных пунктов, находящихся в непосредственной близости к водотоку и его притокам. Наибольшее техногенное воздействие испытывает устьевой участок реки за счет промышленных стоков Муромского приборостроительного завода.

Каменка протекает по густонаселенной территории Суздальского района, впадает в р. Нерль (правый берег), длина водотока 41 км, площадь водосборного бассейна 313 км². Район характеризуется развитым сельским хозяйством, отсутствием крупных промышленных предприятий. Водоток загрязняется ливневыми и паводковыми стоками с территорий крупных животноводческих комплексов и сельхозугодий, пастбищ, с территорий многочисленных сельских поселений и г. Суздаль с частными домами без канализации и неисправными очистными сооружениями города. К загрязнению экосистемы р. Каменка способствовало также нарушение гидрологического режима в

черте г. Суздаль (постройка двух капитальных плотин) и распашка пойменных лугов.

Рпень – левый приток р. Клязьма, длина 44 км, площадь водосбора 270 км², протекает по территории Суздальского района и г. Владимир. Бассейн реки асимметричен за счет правобережных притоков, лесные массивы незначительны (около 13% территории), почвы на водосборе преимущественно распаханы, имеет достаточно высокий уровень урбанизации. Гидрологический режим водотока нарушен (за счет постройки плотин и инженерных прудов). Водосборная территория р. Рпень, за исключением городской зоны, испытывает в основном сельскохозяйственную нагрузку и влияние многочисленных сельских поселений, техногенная нагрузка приходится на промышленные предприятия г. Владимир (машиностроение и химическая промышленность) и жилищно-коммунальное хозяйство.

Содышка – правый приток р. Рпень, протекает по северо-западной окраине г. Владимир, длина водотока 22 км, площадь водосборной территории 82.7 км². Бассейн реки имеет высокий уровень урбанизации с многочисленными сельскими поселениями и коллективными садами (рис. 1). Гидрологический режим нарушен, на реке возведена дамба с образованием в среднем течении водохранилища площадью 102 га. Водоток в верхнем течении испытывает сильное антропогенное воздействие за счет стоков с очистных сооружений и промплощадки компостирования отходов птицефабрик, далее водоток загрязняется стоками с селитебных территорий и несанкционированных свалок твердых бытовых и промышленных отходов в прибрежной полосе водного объекта.

Отбор проб донных отложений для анализа и определение содержания в донных отложениях фосфатов проводили по стандартным методикам. Валовое содержание ТМ в донных осадках оценивали рентгенофлуоресцентным методом на спектрометре “Спектроскан МАКС-GV” [6]. Анализ проб донных отложений проводили в четырех повторностях. Корреляционные зависимости между компонентами донных осадков установлены с использованием программы Statistica 7.

Для характеристики уровня загрязнения донных отложений и техногенных геохимических аномалий ТМ применяли значения коэффициентов концентрации (K_c), которые характеризуют уровень концентрирования (аномальности) элемента в донных отложениях относительно его фонового содержания.

Фоновые концентрации ТМ в донных осадках рек Владимирской обл. были установлены по данным “Отчета о результатах эколого-геохимических исследований антропогенного загрязнения почв (м-б 1:50000–1:25000) и донных осад-

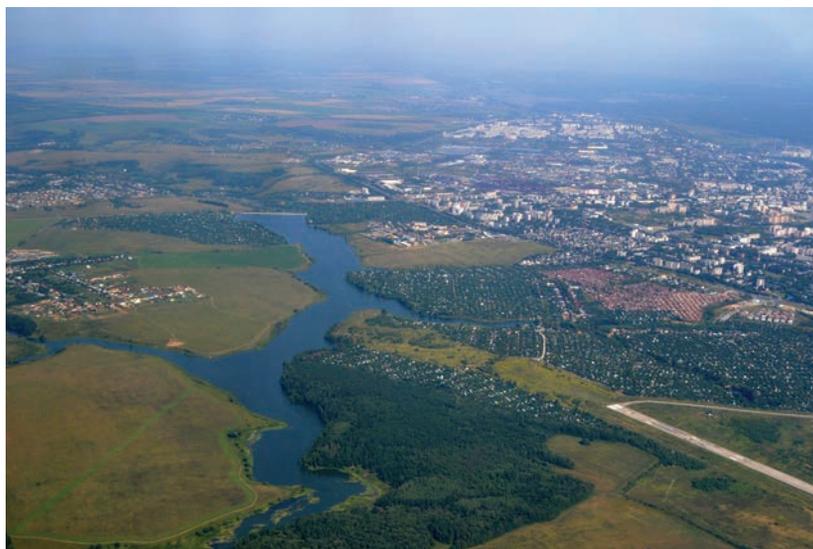


Рис. 1. Водосборный бассейн р. Содышка.

ков (м-б 1:200000)”, подготовленного партией № 1/90 во Владимирской обл. за 1990–1991 гг. (в 2 томах); отв. исполнитель А.Н. Прилепский.

Элементный состав и структуру геохимической аномалии характеризовали по формуле геохимической ассоциации, представляющей собой упорядоченную по значениям ранжированный ряд химических элементов с $K_c \geq 1.5$ [12].

Для расчета усредненной антропогенной нагрузки тяжелых металлов и фосфатов на водотоки использовано предложенное нами соотношение:

$$УАН = \frac{C_{cp} \cdot L}{S},$$

где УАН – усредненная антропогенная нагрузка по конкретному поллютанту, характеризующая поступление поллютанта с 1 км² водосборного бассейна; C_{cp} – средняя концентрация поллютанта, мг/кг; L – длина водотока, км; S – площадь водосборного бассейна, км².

Для выявления техногенных геохимических аномалий в руслах исследованных водотоков выбраны только те металлы, для которых известны их фоновые содержания в донных отложениях рек Владимирской обл.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В табл. 1 представлено содержание фосфатов и ТМ в донных отложениях исследованных водотоков.

Из данных табл. 1 следует, что высокий уровень загрязнения ТМ и техногенные геохимические аномалии характерны для устьевых участков всех изученных водотоков, а также в зоне влияния крупных городов, коллективных садов, круп-

ных сельских поселений, птицефабрик и автомагистралей с интенсивным движением транспорта.

Аномально высокие уровни загрязнения ТМ обнаружены в донных отложениях р. Содышка в зонах влияния коллективных садов и птицефабрик и р. Илевна в ее устье и зоне влияния г. Муром, что связано с поступлением в водоток стоков промышленных предприятий города и п. Вербовский.

В участках геохимических аномалий р. Илевна коэффициенты концентрации ТМ варьируются в следующих пределах: свинца 3.61–8.94, меди 1.63–2.63, хрома 1.60–2.29. Качественный состав геохимической аномалии в районе воздействия коллективных садов (р. Содышка) выражается формулой: $Zn_{16,51}Co_{13,93}Mn_{6,65}Cr_{5,42}Pb_{5,34}Cu_{3,30}$. Ведущие роли в этой ассоциации принадлежат Zn, Co, Mn, что связано с загрязнением стоков нестандартными агрохимикатами, применяемыми при выращивании овощей и фруктов в садах, регуляторов роста растений, микроудобрений, пестицидов, а также с поступлением поллютантов от бытовых промышленных отходов и неочищенных хозяйственных стоков. В целом русло р. Содышка имеет наиболее высокий уровень содержания в донных отложениях ТМ, что связано с тем, что вся водосборная территория водотока расположена в промышленно-урбанизированной зоне с крупными стационарными и диффузными источниками загрязнения.

Полиэлементные геохимические аномалии обнаружены в истоке р. Рпень, где много лет функционировало городское стрельбище. В зоне влияния федеральной трассы М-7 и сельских поселений в русле р. Рпень образовались две геохимические аномалии, характеризующиеся ассоциацией эле-

Таблица 1. Содержание фосфатов и ТМ в донных отложениях малых рек (мг/кг)

Пункт отбора проб	PO ₄ ³⁻	Компоненты							Z _c
		Pb	Cu	Cr	Co	Zn	Fe	Mn	
р. Илевна									
1. Исток	130	57.68	26.04	39.00	6.32	11.16	865	78	4
2. Ниже пос. Булатниково	1200	24.50	49.00	79.20	13.12	63.22	11 141	750	4
3. Стоки д. Котышево	1485	28.28	48.72	79.80	11.44	41.76	7464	480	3
4. Выше устья р. Картынь	485	47.46	40.32	66.60	1.14	27.26	7464	384	3
5. Ниже устья р. Картынь	279	57.26	35.84	37.80	4.88	15.66	2488	276	4
6. Стоки д. Коржавино	1050	47.74	33.60	52.80	1.68	27.84	5192	300	3
7. Ниже устья р. Коварда	855	47.74	47.88	63.00	5.28	31.32	6165	378	4
8. Зона влияния г. Муром	1513	53.90	45.92	102.60	4.40	31.32	7030	672	5
9. Зона влияния г. Муром	1488	50.54	45.64	106.20	2.72	41.18	5949	420	4
10. Зона влияния г. Муром	1683	125.16	69.72	97.80	6.48	84.10	5624	378	12
11. Устье	2009	67.06	73.64	135.60	10.16	93.96	11 573	492	8
C _{ср}	1107	55.21	46.94	78.22	6.15	42.62	6450.46	418.91	
р. Каменка									
1. Исток	500	26.47	34.03	84.02	16.58	88.37	16440	1728	40
2. Стоки с. Губачево	1875	26.95	67.76	106.25	33.58	70.06	24768	3420	46
3. Стоки с. Вышеславское	825	36.54	53.80	88.37	28.93	67.07	18495	1932	49
4. До впадения р. Бакалейка	1900	34.05	66.62	108.07	64.96	79.85	30392	3312	59
5. До впадения р. Тумка	850	52.59	11.99	74.04	34.20	45.80	16440	2070	37
6. После впадения р. Тумка	1375	43.33	53.44	93.51	48.17	77.73	25309	5286	57
6. Стоки с. Янево	375	34.32	60.30	93.28	43.26	71.56	21956	2670	51
8. Стоки г. Суздаль	350	48.20	46.73	94.15	47.65	102.98	17738	1770	61
9. Стоки г. Суздаль	550	46.33	55.33	100.78	16.98	75.27	13087	1230	41
10. Стоки г. Суздаль	500	57.96	28.39	79.98	12.44	47.28	10708	1614	30
11. До очистных сооружений	650	55.82	24.74	70.69	21.85	49.89	12979	1626	32
12. Устье	2250	21.37	55.19	87.44	22.94	68.80	19360	1920	42
C _{ср}	1000	40.33	46.53	90.05	32.63	70.39	18972.67	2381.5	
р. Рпень									
1. Исток	3925	36.82	110.04	217.20	32.16	388.60	27256	2100	22
2. До впадения р. Содышка	1725	60.34	31.64	49.80	5.92	29.58	6598	420	3
3. После впадения р. Содышка	400	40.18	50.40	72.60	10.40	47.56	15575	1092	5
4. Стоки автотрассы М-7	1300	57.40	70.28	101.40	20.96	77.14	16548	528	6
5. До руч. Безымянный	2825	32.06	73.36	97.20	38.40	123.54	31474	2892	16
6. После руч. Безымянный	675	63.14	19.88	62.40	—	35.96	5408	180	4
7. После “Владимирский теп- личный комбинат”	3505	18.48	71.12	85.20	23.28	85.84	23 148	2532	11
8. Зона влияния г. Владимир	1975	65.94	59.36	163.80	—	204.16	14385	780	10
9. Устье	2200	62.02	45.08	108.60	—	162.98	11032	618	7
C _{ср}	2059	48.49	59.02	106.47	14.57	128.37	16824.89	1238	
р. Содышка									
1. Исток	5822	26.46	33.88	84.00	16.64	88.163	2380	1728	48
2. До птицефабрики	18081	52.08	45.36	94.2	44.00	143.84	4110	1152	41
3. После птицефабрики	19613	40.04	48.72	100.80	32.80	117.74	4218	3888	37

Таблица 1. Окончание

Пункт отбора проб	PO ₄ ³⁻	Компоненты							Z _c
		Pb	Cu	Cr	Co	Zn	Fe	Mn	
4. Зона влияния с. Спасское	2823	19.04	36.40	57.60	16.00	85.84	2163	—	33
5. Зона влияния п. РТС	4900	28.98	57.96	104.40	22.00	121.22	2921	—	69
6. Водохранилище	2145	53.34	17.92	64.80	15.52	32.48	2055	2682	14
7. Зона влияния кол. садов	11952	74.76	92.40	325.20	111.44	957.58	6922	3990	133
8. Устье	4290	58.66	33.04	93.00	38.40	113.1	3028	1362	42
C _{ср}	8703	44.17	45.71	115.50	37.10	207.50	3474.63	1850.25	
C _{фон}		14	28	60	8	58	10818	600	

ментов: Pb_{2,29–4,10}Co_{2,60–4,80}Cu_{2,51–2,62}Fe_{1,53–2,91}Cr_{1,62–1,69}. Полиметаллические геохимические аномалии сформировались также в донных отложениях р. Рпень в зонах влияния г. Владимир и в устьевом участке. Приоритетными элементами указанных геохимических аномалий донных отложений водотока явились Pb, Co, Cu, Fe, Cr. Качественный состав ассоциации элементов геохимических аномалий донных осадков р. Рпень в целом отражает специфику источников загрязнения водотока (промышленно-урбанизированный район, сады, предприятия агропромышленного комплекса).

Во всех 12 пунктах отбора пробы донных отложений р. Каменка характеризовались высоким уровнем загрязнения кобальтом (K_c 1.56–8.12), свинцом (K_c 1.53–4.14), марганцем (K_c 2.05–8.81). В 9 из 12 пунктов отбора пробы донных отложений содержали высокие концентрации железа (K_c 1.52–2.81), в 8 – меди (K_c 1.67–2.42), в 6 – хрома (K_c 1.55–1.88). По приоритетности ТМ в донных отложениях р. Каменка образуют ряд: Co > Pb > Mn > Fe > Cu > Cr.

Основные компоненты поверхностных стоков с сельхозугодий, обработанных калийными, фосфорными и азотными удобрениями, и с территорий сельских и городских поселений, загрязненных продуктами эксплуатации транспортных средств различных видов, объединяются в группу: Pb, Co, Mn, Cr, Cu и Zn [10, 13].

О значительном вкладе транспортных средств в загрязнение экосистем исследованных малых рек свидетельствует высокое содержание Pb в составе техногенных аномалий донных отложений всех исследованных водотоков.

Сравнительная оценка уровня техногенного загрязнения русел исследованных водотоков ТМ проводилась нами также по значениям суммарного показателя загрязнения (Z_c), отражающего аддитивное превышение фонового содержания элементов, входящих в состав техногенных геохимических аномалий [2]. По значениям суммарно-

го показателя загрязнения донных отложений ТМ исследованные водотоки образовали ряд: Со-дышка (14.0–133.0) > Каменка (21.5–61.0) > Рпень (4.5–21.9) > Илевна (2.8–12.2).

По значениям коэффициентов концентрации ТМ, загрязняющие донные отложения малых водотоков, условно принято делить на три группы [12]:

– металлы, концентрация которых превышает фоновый уровень более 1.5 раза (K_c > 1.5);

– металлы, с концентрацией, близкой к фоновым (K_c от 0.70 до 1.5);

– металлы, с концентрацией ниже фоновых (K_c ≤ 0.70).

Из 36 проанализированных проб донных отложений р. Рпень коэффициенты концентрации с превышением более 1.5 имели 88.9% проб по Pb; 77.8% – по Cu; 55.6% – по Cr; 44.4% образцов по Co, Zn, Fe и Mn. Ниже фоновой концентрации содержались Zn, Fe, Mn в 22.2% проб.

В донных отложениях р. Содышка элементы с коэффициентами концентрации выше 1.5 содержались в анализированных пробах: по Co – 100%, Pb – 87.5%, Cr – 75.0%, Mn – 75.0%, Cu – 62.5%, Cu – 50.0%. Ниже фоновой были коэффициенты концентрации в пробах: Fe – 100%, Zn, Cr, Cu – 12.5%.

В донных отложениях р. Каменка коэффициенты концентрации, существенно превышающие 1.5, обнаружены по Co, Pb, Mn в 100% проб, Cu – в 66.7%, Cr – в 50.0% и Zn лишь в 16.7% проб. Ниже фона имели уровень содержания Zn – 25.0% проб и Cu – 16.7% проб.

В геохимических аномалиях донных отложений р. Илевна коэффициент концентрации более 1.5 имели следующие металлы (в процентах от количества проанализированных образцов): Pb (100); Cu (63.6); Cr (36.4), Co (9.1); Zn (9.1). Пробы донных отложений р. Илевна, содержащих металлы ниже фонового уровня, образуют ряд: Cu – 9.0%; Cr – 27.3%; Co – 72.7%; Zn – 72.7%; Fe – 81.8%; Mn – 81.8%.

Таблица 2. Корреляционные зависимости между концентрациями ТМ и содержанием фосфатов в донных отложениях исследованных рек

Водоток	Металл	Коэффициент корреляции, <i>r</i>	Доверительный интервал, <i>p</i>
Илевна	Cu	0.83	0.002
	Cr	0.91	0.002
	Zn	0.81	0.002
	Fe	0.69	0.019
	Mn	0.62	0.043
Каменка	Pb	0.58	0.047
	Fe	0.65	0.022
Рпень	Cu	0.75	0.020
	Zn	0.69	0.041
	Fe	0.71	0.033
	Mn	0.75	0.020

Для донных отложений исследованных рек характерно также аномально высокое загрязнение соединениями фосфора (см. табл. 1), что связано с поступлением стоков с птицефабрик, животноводческих комплексов, территорий сельхозугодий, сельских и городских поселений, не имеющих канализации, и высокой биологической продуктивностью гидроэкосистем, вследствие процессов эвтрофикации.

По уровню загрязнения донных отложений фосфатами водотоки расположились в ряд: Содышка > Рпень > Каменка > Илевна. Максимальный уровень загрязнения донных отложений фосфатами характерен для р. Содышка, которая служит приемником сточных вод двух крупнейших птицефабрик региона и хозфекальных стоков множества небольших сельских поселений и СНТ, расположенных на водосборной территории, а р. Рпень – стоков с территорий сельских поселений, ГУП “Тепличный” и г. Владимир. Минимальный уровень загрязнения фосфатами имеют донные осадки р. Илевна, поскольку существенная часть водосборного бассейна водотока расположена на малонаселенной территории Муромского Предочья.

Тяжелые металлы в донных отложениях могут накапливаться в виде труднорастворимых фосфатов, адсорбироваться на оксидах железа и марганца, глинистыми минералами и органическим веществом, а также образовывать малорастворимые соединения в восстановительно-сульфидной среде [7]. Исходя из этого представляло интерес изучение корреляционных зависимостей между различными компонентами донных отложений. Нами обнаружена хорошая корреляция между концентрациями ТМ и содержанием фосфатов донных отложений р. Рпень и Илевна и удовлетворительная для р. Каменка (табл. 2).

Отсутствие корреляционных зависимостей между компонентами донных отложений рек связано с чрезвычайно высоким уровнем загрязнения экосистем водотоков растворимыми солями (солевой эффект) [9].

В табл. 3 представлены данные по усредненной антропогенной нагрузке ТМ и фосфат ионов в изученных водотоках.

Таким образом, максимальной антропогенной нагрузке подвергается р. Содышка, минимальной – р. Илевна, что главным образом связано с населенностью и степенью освоенности их водосборных территорий. По величине усредненной антропогенной нагрузки на исследованные водотоки загрязняющие вещества образовали ряд $Fe > PO_4^{3-} > Mn > Zn > Cr > Cu > Co > Pb$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Донные отложения исследованных малых рек Владимирской обл. имеют аномально высокие уровни загрязнения тяжелыми металлами и фосфатами. В донных осадках рек сформировалось множество техногенных полиметаллических геохимических аномалий. Качественный состав ассоциаций элементов геохимических аномалий донных отложений адекватно отражает специфику источников загрязнения водотоков. По величине Z_c ТМ в донных отложениях рассмотренные водотоки образуют ряд: Содышка > Каменка > Рпень > Илевна, а по уровню загрязнения фосфатами последовательность: Содышка > Рпень > Каменка > Илевна.

Таблица 3. Значения усредненных величин антропогенной нагрузки (УАН) на водотоки (мг/км)

Водоток	ТМ							PO_4^{3-}
	Pb	Cu	Cr	Co	Zn	Fe	Mn	
Илевна	2.57	2.18	3.63	0.29	1.98	299.67	19.46	51.43
Каменка	5.28	6.09	11.80	4.27	9.22	2485.24	311.95	130.99
Рпень	7.90	9.62	17.35	2.37	20.92	2741.83	201.75	335.52
Содышка	11.75	12.16	30.73	9.87	55.20	924.33	492.21	2315.25

Приоритетными компонентами геохимических аномалий р. Содышка явились Co, Pb, Cr, Mn, р. Рпень – Pb, Cu, Cr, р. Каменка – Co, Pb, Mn, Cu, р. Илевна – Pb, Cu.

Рассчитаны усредненные значения антропогенной нагрузки на малые реки. По величине УАН на исследованные водотоки загрязняющие вещества образовали ряд: $Fe > PO_4^{3-} > Mn > Zn > Cr > Cu > Co > Pb$.

При изменении гидрохимических, гидродинамических, кислотно-основных, окислительно-восстановительных условий в гидроэкосистеме, увеличении ионной силы водной фазы донные отложения становятся источниками вторичного загрязнения рек ТМ, фосфатами, токсичными органическими веществами, что вызовет эвтрофикацию и токсификацию гидроэкосистемы, нарушение кислородного режима и процессов самоочищения, что приведет к гибели наиболее чувствительной части гидробиоты и деградации гидроэкосистемы. Это свидетельствует о необходимости проведения срочной расчистки наиболее загрязненных участков русел от донных отложений рек Содышка, Каменка и Рпень.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бубенов Р.Н., Борисенко В.И., Даниленко А.А., Бубенова Л.А. О некоторых аспектах оценки негативно-антропогенного воздействия на качество поверхностных водных объектов в системе обеспечения экологической безопасности // Юг России: экология, развитие. 2018. Т. 13. № 4. С. 147–156. <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2018-4-147-156>
2. Геохимия окружающей среды / [Ю.Е. Саэт, Б.А. Ревич, Е.П. Янин и др.]. М.: Недра, 1990. 335 с.
3. Даценко Ю.С. Эвтрофирование водохранилищ. Гидролого-гидрохимические аспекты. М.: ГЭОС, 2007. 252 с.
4. Коломийцев Н.В., Корженевский Б.И., Ильина Т.А., Гетьман Е.Н. Оценка техногенной нагрузки на водные объекты по загрязненности донных отложений // Мелиорация и водное хозяйство. 2015. № 6. С. 15–19.
5. Корженевский Б.И., Коломийцев Н.В., Толкачев Г.Ю., Ильина Т.А. Геоэкологические характеристики современных донных отложений озера Селигер вблизи города Осташкова // Экологические системы и приборы. 2022. № 1. С. 15–23. <https://doi.org/10.25791/esip.1.2022.1278>
6. Методика выполнения измерений массовой доли металлов и оксидов металлов в порошкообразных пробах почв методом рентгенофлуоресцентного анализа. М 049-П/04. СПб.: ООО НПО “Спектрон”, 2004. 20 с.
7. Методические рекомендации по геохимической оценке загрязнения территорий городов химическими элементами / [Сост. Б.А. Ревич и др.]. М.: ИМГРЭ, 1982. 112 с.
8. Нежиховский Р.А. Гидролого-экологические основы водного хозяйства. Л.: Гидрометеиздат, 1990. 228 с.
9. Сатаров Г.А. Экологические аспекты применения агрохимикатов // Ульяновский медико-биологический журнал. 2013. № 1. С. 138–147.
10. Скурлатов Ю.И., Дука Г.Г., Мизити А. Введение в экологическую химию. М.: Высшая школа, 1994. 400 с.
11. Толкачев Г.Ю., Корженевский Б.И. Загрязнение тяжелыми металлами донных отложений реки Пекши и оценка техногенной нагрузки // Использование и охрана природных ресурсов в России. 2020. № 4 (164). С. 68–71.
12. Янин Е.П. Техногенные илы в реках Московской области: (геохим. особенности и экол. оценка). М.: ИМГРЭ, 2004. 96 с.
13. Kabata-Pendias A. Trace elements in soils and plants. 4th ed. Taylor and Francis Group, LLC, 2011. 505 p.

ASSESSMENT OF BOTTOM SEDIMENT POLLUTION IN SMALL RIVERS, VLADIMIR REGION

S. M. Chesnokova^{a,*} and O. V. Savel'ev^{a,**}

^aStoletovy Vladimir State University, ul. Gor'kogo 87, Vladimir, 600000 Russia

*E-mail: chesnokova.chemist@mail.ru

**E-mail: olegator86@bk.ru

The results of assessing pollution of bottom sediments in four small rivers of the Vladimir region with heavy metals (HM) and phosphates are presented. According to HM concentration coefficients characterizing the concentration (anomaly) of elements in bottom sediments in respect to their background content in the region, the zones of technogenic multi-element geochemical anomalies in the channels of all studied watercourses and their structure were identified. It has been established that Fe, Pb, Co, Cu, Zn, Cr, and Mn are the priority metals of technogenic geochemical anomalies in bottom sediments. The highest pollution of bottom sediments with these metals is typical for the zones influenced by the runoff from the territories of collective orchards, livestock complexes, large industrial cities and rural settlements. According to the total pollution indicator (Zc), which reflects the additive excess of the background content of a group of heavy metals that are part of technogenic geochemical anomalies, the studied watercourses are located in the following or-

der: Sodyshka > Kamenka > Rpen > Ilevna, and according to the phosphate content: Sodyshka > Rpen > Kamenka > Ilevna. Correlations between the components of bottom sediments have been studied. The average load of heavy metals and phosphates on watercourses was assessed.

Keywords: *small rivers, bottom sediments, polymetallic geochemical anomalies, phosphates, average anthropogenic load, dependencies*

REFERENCES

1. Bubenov, R.N., Borisenko, V.I., Danilenko, A.A., Bubenova L.A. *O nekotorykh aspektakh otsenki negativnogo antropogennogo vozdeistviya na kachestvo poverkhnostnykh vodnykh ob'ektov v sisteme obespecheniya ekologicheskoi bezopasnosti* [On some aspects of assessing the negative anthropogenic impact on the quality of surface water bodies in the system of ensuring environmental safety]. *Yug Rossii: ekologiya, razvitie*, 2018, vol. 13, no 4, pp. 147–156. <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2018-4-147-156>. (in Russian)
2. *Geokhimiya okruzhayushchei sredy* [Environmental geochemistry]. Yu.E. Saet, B.A. Revich, E.P. Yanin, et al. Moscow, Nedra Publ., 1990, 335 p. (in Russian)
3. Datsenko, Yu.S. *Evtrofirovaniye vodokhranilishch. Gidrologo-gidrokhimicheskie aspekty* [Eutrophication of water reservoirs. Hydrological and hydrochemical aspects]. Moscow, GEOS Publ., 2007, 252 p. (in Russian)
4. Kolomiitsev, N.V., Korzhenevskii, B.I., Il'ina, T.A., Get'man, E.N. *Otsenka tekhnogennoi nagruzki na vodnye ob'ekty po zagryaznenosti donnykh otlozhenii* [Estimation of technogenic load on water bodies based on pollution of bottom sediments]. *Melioratsiya i vodnoe khozyaistvo*, 2015, no. 6, pp. 15–19. (in Russian)
5. Korzhenevskii, B.I., Kolomiitsev, N.V., Tolkachev, G.U., Il'ina, T.A. *Geoekologicheskie kharakteristiki sovremennykh donnykh otlozhenii ozera Seliger vblzi goroda Ostashkov* [Geoecological characteristics of modern bottom sediments of Lake Seliger near the city of Ostashkov]. *Ekologicheskie sistemy i pribory*. 2022, no. 1, pp. 15–23. <https://doi.org/10.25791/esip.1.2022.1278>. (in Russian)
6. *Metodika vypolneniya izmerenii massovoi doli metallov i oksidov metallov v poroshkoobraznykh probakh pochv metodom rentgenofluoretsentnogo analiza* [Method for measuring the mass fraction of metals and metal oxides in powdered soil samples by X-ray fluorescence analysis]. St. Petersburg, OOO NPO "Spektron", 2004, 20 p. (in Russian)
7. *Metodicheskie rekomendatsii po geokhimicheskoi otsenke zagryazneniya territorii gorodov khimicheskimi elementami* [Guidelines for the geochemical assessment of pollution of urban areas with chemical elements]. B.A. Revich, Yu.E. Saet, R.S. Smirnova, E.P. Sorokina. Moscow, IMGRE Publ., 1982, 112 p. (in Russian)
8. Nezhikhovskii, R.A. *Gidrologo-ekologicheskie osnovy vodnogo khozyaistva* [Hydrological and ecological foundations of water management]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1990, 228 p. (in Russian)
9. Satarov, G.A. *Ekologicheskie aspekty primeneniya agrokhimikatov* [Environmental aspects of the use of agrochemicals]. *Ul'yanovskii mediko-biologicheskii zhurnal*, 2013, no. 1, pp. 138–147. (in Russian)
10. Skurlatov, Yu.I., Duka, G.G., Miziti, A. *Vvedenie v ekologicheskuyu khimiyu* [Introduction to environmental chemistry]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1994, 400 p. (in Russian)
11. Tolkachev, G.Yu., Korzhenevskii, B.I. *Zagryaznenie tyazhelymi metallami otlozhenii reki Pekshi i otsenka tekhnogennoi nagruzki* [Pollution of bottom sediments in Peksha river with heavy metals and estimation of technogenic load]. *Ispol'zovanie i okhrana prirodnykh resursov v Rossii*, 2020, no. 4 (164), pp. 68–71. (in Russian)
12. Yanin, E.P. *Tekhnogenne ily v rekakh Moskovskoi oblasti: (geokhim. osobennosti i ecol. otsenka)* [Technogenic silts in the rivers of Moscow region: (geochemical features and ecological assessment)]. Moscow, IMGRE Publ., 2004, 96 p. (in Russian)
13. *Kabata-Pendias A. Trace elements in soils and plants*. 4th ed. Taylor and Francis Group, LLC, 2011, 505 p.

УДК 502/504

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСЧЕТА РЕКРЕАЦИОННОЙ НАГРУЗКИ НА ГОРОДСКИЕ ОЗЕЛЕНЕННЫЕ ТЕРРИТОРИИ

© 2023 г. О. Н. Дьячкова^{1,*}, А. Е. Михайлов¹¹Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ),
2-я Красноармейская ул., 4, Санкт-Петербург, 190005, Россия

*E-mail: dyachkova_on@mail.ru

Поступила в редакцию 20.10.2022 г.

После доработки 23.01.2023 г.

Принята к публикации 30.01.2023 г.

В статье дано описание ранговой модели для расчета рекреационной нагрузки на городские озелененные территории общего пользования. Предложенная математическая интерпретация позволяет провести сравнительный анализ распределения потенциальной рекреационной нагрузки на территории зеленых насаждений общего пользования от городских жителей, проживающих в близлежащих жилых кварталах. Модель разработана на основе теории вероятностей. Модель состоит из двух частей. В первой части рекреационная нагрузка определяется как математическое ожидание числа посетителей на основе данных о численности населения жилого квартала и ранге его территории по отношению к озелененным территориям общего пользования (лес, лесопарк, парк, сад, сквер или бульвар). Во второй части рекреационная нагрузка рассматривается как пуассоновская случайная величина с параметром, зависящим от времени. В установленных условных границах исследуемого участка города, территории зеленых насаждений общего пользования и территории, окружающих их близлежащих жилых кварталов, рассматриваются как точечные объекты. Модель может быть использована для анализа, как сложившейся градостроительной ситуации, так и перспектив ее изменения. Модель может быть полезна, в целом для лиц, принимающих решения при комплексном развитии городских территорий, и в частности, при благоустройстве существующих озелененных территорий общего пользования.

Ключевые слова: город, городская среда, комплексное развитие территории, жилой квартал, озелененные пространства, качество жизни, ранговая модель, теория вероятностей

DOI: 10.31857/S0869780923020042, EDN: TWIJHR

ВВЕДЕНИЕ

Основное направление социально-экономического развития города – его устойчивое развитие [2]. Возможность отдыха для городских жителей на открытом воздухе в тени деревьев оказывает существенное влияние на качество их жизни и, как следствие, на экономическую ситуацию в стране. В Повестке дня в области устойчивого развития (Цель 11, задача 11.7) заложено “К 2030 году обеспечить всеобщий доступ к безопасным, доступным и открытым для всех зеленым зонам и общественным местам, особенно для женщин и детей, пожилых людей и инвалидов”¹. Рост численности городского населения требует при комплексном развитии городов уделять больше внимания благоустройству жилых районов территориями зеленых насаждений общего пользования, поскольку объемы жилой застройки и улично-дорожной сети стреми-

тельно вытесняют природные участки древесно-кустарниковой и травяной растительности [6, 10]. Поиск решений по планированию и управлению доступными для всех жителей городских лесов, лесопарков, парков, садов, скверов и бульваров находит отражение в исследованиях российских [4] и иностранных ученых [11–13, 16]. Особое внимание уделяется нормативно-техническому регулированию обеспеченности населения зелеными зонами [1, 3]. Также изучаются городские природные территории и природно-антропогенные комплексы с позиций удобства их пешей доступности и охраны окружающей среды [8, 9].

Принципы и методы определения рекреационных нагрузок и их использования при организации рекреационного природопользования, а также при проектировании рекреационных объектов разрабатываются в нашей стране с 1970-х гг.

“Рекреационная нагрузка – это показатель антропогенного воздействия, определяемый количеством отдыхающих на единицу площади с уче-

¹ https://unstats.un.org/sdgs/indicators/Global%20Indicator%20Framework%20after%202020%20review_Rus.pdf

том времени их пребывания на объекте рекреации и вида отдыха”².

В нормативно-технических документах, регламентирующих градостроительную деятельность, нормируются минимальная площадь озелененных территорий общего пользования в городских и сельских населенных пунктах, радиус обеспечения населения объектами рекреации, время доступности и предельная рекреационная нагрузка в зависимости от типа рекреационного объекта^{3, 4}.

В нормативно-технической документации лесного хозяйства разработаны рекомендации, приведенные в Стандарте отрасли ОСТ 56–100–95 “Методы и единицы измерения рекреационных нагрузок на лесные природные комплексы” (утв. приказом Рослесхоза от 20 июля 1995 г. № 114), а также в документе – “Временная методика определения рекреационных нагрузок на природные комплексы при организации туризма, экскурсий, массового повседневного отдыха и временные нормы этих нагрузок” (утв. зам. председателя Государственного комитета СССР по лесному хозяйству).

Широкое использование сравнительного анализа существующих рекреационных нагрузок в градостроительной деятельности сдерживается отсутствием унифицированных понятий, методов и единиц измерений, трудоемкость натуральных измерений.

Цель настоящего исследования – разработка математической модели для сравнительного анализа распределения рекреационной нагрузки на территории зеленых насаждений общего пользования населением окружающих их жилых кварталов.

В качестве объекта исследования принимается территория города. Предметом исследования являются параметры территорий жилых кварталов и озелененных территорий общего пользования, доступных для их жителей.

Задачи исследования:

- проведение анализа массива открытых данных, соответствующих направлению исследования, и существующих математических моделей, применяемых для анализа мобильности населения;
- разработка математического аппарата для проведения экспертизы градостроительной ситу-

ации, сокращающего трудозатраты работы эксперта в данной предметной области.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для описания мобильности населения применяют модели, основанные на расстояниях или на рангах.

Попытки построить модель для исследования городской среды, основанную на расстояниях, приводят к комплексу трудно решаемых задач, поскольку: 1) в районах города существует множество маршрутов, соединяющих локации; 2) поток по каждому маршруту может быть разным; 3) трафик на маршрутах, соответственно, тоже различен.

Модель, основанная на рангах, позволяет исследуемые локации городской среды рассматривать как точечные объекты, исключая необходимость генерировать индивидуальные маршруты. Авторы статьи [14] отмечают, что ранг между двумя местами обладает важным свойством быть инвариантным в масштабированных версиях города, где относительное расположение мест сохраняется, но абсолютные расстояния увеличиваются (“*the rank between two places has the important property to be invariant in scaled versions of a city, where the relative positions of the places is preserved but the absolute distances dilated*”).

Модель расчета рекреационной нагрузки разработана на основе теории вероятности для исследуемой городской территории с определенной численностью населения из условия, что у случайно выбранного местного жителя этой территории может присутствовать некоторая вероятность желаня посетить территорию зеленых насаждений общего пользования, расположенную на доступном расстоянии от места его проживания. Модель предусматривает ряд допустимых упрощений. Вероятность, что некий житель вообще посетит какую-либо озелененную территорию общего пользования, а также вероятность, что он предпочтет для посещения конкретную территорию зеленых насаждений. Учитывая принадлежность некоего жителя к той или иной социально-демографической группе с характерным ритмом жизни и видами активности на открытом воздухе, а также, что жилые кварталы, как правило, имеют благоустроенные придомовые территории, то у случайно выбранного местного жителя желание выйти за пределы этой территории может присутствовать потенциально [5].

В целях исследования для расчета потенциальной рекреационной нагрузки на озелененную территорию общего пользования или, другими словами, для определения востребованности озелененной территории общего пользования жителями близлежащих кварталов с использованием

² СП 475.1325800.2020 Парки. Правила градостроительного проектирования и благоустройства. М.: Стандартинформ, 2020.

³ СП 42.13330.2016 Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений. М.: Стандартинформ, 2017.

⁴ ТСН 30-307-2002 г. Москвы (МГСН 1.02-02) Нормы и правила проектирования комплексного благоустройства на территории города Москвы М.: ГУП “НИИЦ”, 2002.



Рис. 1. Принципиальная расчетная схема.

ранговой модели исследуемая территория города разбивается на области, которые объединяются ранжированными полями (рис. 1). Надо отметить, в процессе исследования целесообразно рассматривать несколько возможных вариантов разбивки исследуемой городской территории на единичные области и их принадлежности к полям.

Областью может являться устойчивый фрагмент городской территории, например, жилой квартал, имеющий физические границы – улично-дорожная сеть. Предположительно количество областей будет увеличиваться в каждом следующем по удаленности от озелененной территории общего пользования поле, соответственно, от одного до нескольких десятков, но в крайнем по удаленности поле не превысит сотню.

Нагрузка/востребованность озелененной территории общего пользования складывается из суммы нагрузок/востребованности от каждой отдельной области.

Нагрузка/востребованность обратно пропорциональна рангу поля, которому принадлежит область.

Выбранная для исследования городская территория должна включать озелененную территорию общего пользования и окружающие ее территории жилых кварталов, жители которых являются ее потенциальными посетителями. На рассматриваемом участке могут находиться несколько озелененных территорий общего пользования и множество жилых кварталов. Площадь жилого квартала должна быть достаточно большой, а численность его населения составлять не менее тысячи человек (условие коррелируется с рекомендациями по проектированию СП 42.13330.2016).

Модель разработана для исследования городских территорий, которым характерна типовая застройка жилых микрорайонов, например, многоквартирными жилыми домами различной этажности.

Валидация модели осуществляется на уровне входных данных путем анализа и оценивания исходных параметров и возможного изменения их значений.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Среди территорий зеленых насаждений общего пользования – лес, лесопарк, парк, сад, сквер, бульвар целесообразно различать озелененные пространства, которые преимущественно используются местными жителями, и озелененные пространства, привлекающие не только жителей, но и гостей города. В нашем исследовании предлагается математическая модель для сравнительного анализа рекреационных нагрузок на территории зеленых насаждений общего пользования от населения, проживающего в близлежащих жилых кварталах. Рекреационная нагрузка от туристических потоков на озелененные территории, являющиеся городскими достопримечательностями местного, регионального или федерального значения, может быть рассчитана отдельно и при необходимости суммирована.

Предлагаемая к обсуждению модель состоит из двух частей, с помощью которых разными способами можно рассчитать рекреационные нагрузки на территории зеленых насаждений общего пользования, которые расположены в так называемых “спальных районах” города.

Для расчета рекреационной нагрузки на ту или иную озелененную территорию общего пользования согласно **первой части модели** предлагается формула вида:

$$M = \sum_i K_i \frac{P_i}{f(r_i)} N_i,$$

где K_i – коэффициент привлекательности территории зеленых насаждений общего пользования; P_i – величина, выражающая потенциальное же-

вание некоего жителя посетить близлежащую территорию зеленых насаждений общего пользования; r_i – ранг территории жилого квартала (ранг отражает принадлежность области к полю областей с установленным расстоянием в отношении доступности озелененной территории общего пользования); $f(r_i)$ – некоторая функция от ранга территории жилого квартала (далее рассматривается вариант, когда $f(r_i) = r_i$); N_i – численность населения территории жилого квартала.

Разумеется, коэффициенты K_i и P_i зависят от времени (сезона, дня недели и пр.), т.е. формулу можно понимать как среднюю рекреационную нагрузку в некоторый конкретный момент времени.

Оптимальной элементарной территорией (областью) для данного расчета является жилой квартал, расположенный в границах “красных” линий улиц.

Следует отметить, что жилые кварталы города могут быть неоднородны по отношению друг к другу, тогда в преддверии расчета по предложенной формуле потребуется уточнить структуру неоднородности и выполнить дополнительное исследование степени ее влияния при формировании рекреационной нагрузки.

В частном случае единицей городской территории, формирующей нагрузку на ту или иную территорию зеленых насаждений общего пользования, является некая область (жилой квартал), которую можно считать относительно однородной по типу и плотности застройки, а также возрастной и социальной структурам населения.

В математической интерпретации, рассматриваемые i -и территории жилых кварталов исследуемой городской территории и расположенные на ней леса, лесопарки, парки, сады, скверы и бульвары представляют собой материальные точки. Разбив близлежащие окрестности той или иной территории зеленых насаждений общего пользования на области, соответственно рангу по степени их удаленности, учитывающей доступность места проживания потенциальных посетителей, получим

$$M = \sum_i K_i \frac{P_i}{r_i} N_i.$$

Если выражение $K_i \frac{P_i}{r_i}$ интерпретировать как вероятность посещения территории зеленых насаждений общего пользования жителями жилого квартала, тогда M является математическим ожиданием числа посетителей.

Предварительно целесообразно определить коэффициент привлекательности для жителей территории зеленых насаждений общего пользования (K), рекреационную нагрузку на которую планируется рассчитывать. Например, провести

экспертную оценку озелененной территории или опрос жителей для выявления их предпочтений относительно того или иного леса, лесопарка, парка, сада, сквера и бульвара с последующим агрегированием данных анкетирования экспертов или опросов, а для анализа мнений экспертов или респондентов использовать метод парного сравнения [15].

Справедливо предположение, что для жителей i -х областей, расположенных ближе к территории зеленых насаждений общего пользования, величина P является максимальной, а для следующих по рангу полей значение, соответственно, уменьшается пропорционально их рангу.

Допуская, что величина K зависит только от параметров территории зеленых насаждений общего пользования, а величина P бесконечно мала или является константой, формула примет вид

$$M = KP \sum_i \frac{N_i}{r_i}.$$

Таким образом, можно обозначить территориальный коэффициент, как

$$\hat{M} = \sum_i \frac{N_i}{r_i}.$$

Верификация первой части модели выполнена авторами данной статьи на примере участка территории Санкт-Петербурга, результаты опубликованы в [7]. Исходными данными для экспертов, проводивших исследование, являлись данные Управления Федеральной службы государственной статистики по Санкт-Петербургу и Ленинградской области (<https://petrostat.gks.ru/>) и Региональная геоинформационная система Санкт-Петербурга (<https://www.rgis.spb.ru/>).

Вторая часть модели для расчета рекреационной нагрузки на территории зеленых насаждений общего пользования выражается формулой, в которой количество посещений озелененной территории жителями i -го жилого квартала за период времени $[t_1; t_2]$ рассматривается как пуассоновская случайная величина с параметром

$$\lambda = \frac{K_i}{r_i} N_i \int_{t_1}^{t_2} p(t) dt,$$

где $p(t)$ – некоторая функция плотности.

Вторая часть модели, являясь более сложной, позволит учитывать такие характеристики как сезонность посещений, их зависимость от дня недели, рабочих и нерабочих дней, времени суток, погодных условий. Сложность этой части модели – в ее трудоемкости, так как предполагается предварительное определение зависимостей, например, проведение моментных замеров при натурном исследовании.

Апробация второй части модели находится в разработке.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен анализ применяемых в лесном хозяйстве и градостроительной деятельности традиционных подходов к расчету рекреационной нагрузки на природные территории. Авторы полагают, что рекреационная нагрузка на озелененные территории общего пользования связана не только с распределением населения окружающих ее жилых кварталов, но также с ее привлекательностью и социально-демографическим составом населения. Использование коэффициента позволяет учесть привлекательность озелененных территорий общего пользования для жителей.

При выборе математической модели для исследования городской среды предпочтение отдано ранговой.

Разработанная модель годится для определения потенциальной рекреационной нагрузки/востребованности озелененных территорий общего пользования, функционирующих на территории города. В модели рассматривается обратная пропорциональность рангу согласно закону Ципфа.

Части модели существенно различаются по трудоемкости. Для анализа градостроительной ситуации по первой части модели эксперту предельной области достаточно открытых данных. Ограничения модели имеют в большей степени технический характер. Не отменяя модели, существенно усложнит расчет наличие неоднородности по социально-демографическому составу населения, по типу и плотности застройки у выделенных областей (жилых кварталов). Так как коэффициенты K и P зависят от параметров исследуемых объектов, то в случае однородности территорий их можно вынести за скобки, а в случае неоднородности их нужно рассчитывать для каждой территории отдельно.

С помощью модели можно проводить сравнительный анализ рекреационной нагрузки на выделенные озелененные территории общего пользования от определенных областей — жилых кварталов.

Модель может быть полезна для анализа распределения косвенной антропогенной нагрузки на природные компоненты территорий зеленых насаждений общего пользования, а также для анализа загруженности этих территорий с позиции комфортности посещений жителями.

Преимуществом модели является ее адаптивность к изменяющейся градостроительной ситуации. Так как с большой вероятностью можно предположить, что структура и плотность застройки жилого квартала могут меняться со временем (например, при реновации или уплотнительной застройке), а существующая улично-дорожная сеть более стабильна и устойчива к изменениям градостроительной ситуации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Базилевич А.М.* Вопросы методологии градостроительного нормирования озелененных территорий // Лесной вестник. 2018. Т. 22. № 3. С. 76–84. <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2018-3-76-84>
2. *Бакаева Н.В., Черняева И.В.* Вопросы озеленения городской среды при реализации функций биосферосовместимого города // Строительство и реконструкция. 2018. № 2 (76). С. 85–94.
3. *Борисов М.В., Бакаева Н.В., Черняева И.В.* Нормативно-техническое регулирование в области озеленения городской среды // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. Вып. 2. С. 212–222. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2020.2.212-222>
4. *Данилина Н.В., Маджорзадехзахири А.* Analysis Situation of Urban Green Space Framework in Tehran // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. Вып. 8. С. 975–985. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2021.8.975-985>
5. *Дьячкова О.Н.* Зеленые насаждения в системе благоустройства придомовых (приватных) территорий многоквартирных зданий // Геоэкология. 2022. № 1. С. 85–95. <https://doi.org/10.31857/S0869780922010039>
6. *Дьячкова О.Н.* Принципы стратегического планирования развития “зеленой” инфраструктуры городской среды // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. Вып. 8. С. 1045–1064. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2021.8.1045-1064>
7. *Дьячкова О.Н., Михайлов А.Е.* Методика расчета рекреационной нагрузки на локальные парки // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. 2022. № 3. С. 121–133. <https://doi.org/10.21869/2311-1518-2022-38-3-121-133>
8. *Слепнев М.А., Попов А.В.* Экологическая емкость городских природно-антропогенных территориальных комплексов // Жилищное строительство. 2019. № 3. С. 57–60. <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2019-3-57-60>
9. *Слепнев М.А., Филякова Е.И.* Оценка рекреационной нагрузки городского парка культуры и отдыха город Орел // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. 2019. № 3. С. 101–110. <https://doi.org/10.21869/23-11-1518-2019-27-3-101-110>
10. *Сотникова О.А., Богатова Т.В., Семенова Э.Е.* Устойчивое развитие территорий: соотношение природной среды и городской застройки // Социология города. 2020. № 3. С. 30–40.
11. *Arvanitidis P.* Unlocking Green Space: Perceptions and Attitudes on Various Aspects of Urban Green Space // GreenKeys, 2007. <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.536.6483&rep=rep1&type=pdf>
12. *Douglas O., Lennon M., Scott M.* Green Space Benefits for Health and Well-Being: A Life-Course Approach for Urban Planning, Design and Management // Cities. 2017. V. 66. P. 53–62. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2017.03.011>
13. *Niemelä J.* Ecology of urban green spaces: The way forward in answering major research questions // Landscape and Urban Planning. 2014. V. 125. P. 298–303. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2013.07.014>

14. Noulas A., Scellato S., Lambiotte R., Pontil M., Mascolo C. A Tale of Many Cities: Universal Patterns in Human Urban Mobility // PLoS ONE. 2012. 7 (5). e37027. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0037027>
15. Saaty T.L. Relative Measurement and Its Generalization in Decision Making. Why Pair-wise Comparisons are Central in Mathematics for the Measurement of Intangible Factors // The Analytic Hierarchy/Network Process. RACSAM – Rev. R. Acad. Cien. Serie A. Mat. 2008. No. 102 (2). Pp. 251–318.
16. Zhang L., Cao H., Han R. Residents' Preferences and Perceptions toward Green Open Spaces in an Urban Area // Sustainability. 2021. 13. 1558. <https://doi.org/10.3390/su13031558>

MATHEMATICAL MODEL FOR CALCULATION OF RECREATIONAL LOAD ON GREEN OPEN SPACE IN CITY

O. N. D'yachkova^{a,#} and A. E. Mikhailov^a

^a*St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering,
2ya Krasnoarmeiskaya ul. 4, St. Petersburg, 190005 Russia*

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

The article presents a description of the rank model for calculating the recreational load on the territory of green open space. The object of our research is the demand for open green spaces in the city for local residents. Our model is based on the theory of chances. Within the framework of research need imagine that all territories (including territories of location green open space and territories of location residential district) are taken as material points. This means that the internal structure of the allocated territory can be ignored within the framework of this model. The attitude of the urban population towards green spaces that are close to their place of residence is important to study in different ways. Our model includes two parts: in the first part of this model the recreational load is considered as a mathematical expectation of the number of visitors; in the second part, the recreational load is considered as a Poisson random variable with a time-dependent parameter. Decision makers can use this model for substantiation of urban planning standards, for developing urban areas and for landscaping.

Keywords: *city, urban environment, complex development of the territory, residential complex, green open spaces, the quality of life, rank model, theory of chances*

REFERENCES

1. Bazilevich, A.M. *Voprosy metodologii gradostroitel'nogo normirovaniya ozelenennykh territorii* [Methodological issues of urban planning regulation for green areas]. *Lesnoi vestnik*, 2018, no 22 (3), pp. 76–84. <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2018-3-76-84> (in Russian).
2. Bakaeva, N.V., Chernyaeva, I.V. *Voprosy ozeleneniya gorodskoi sredy pri realizatsii funktsii biosferosovmestimogo goroda* [Issues of greening the urban environment in the implementation of the functions of the biosphere-compatible city]. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*, 2018, vol. 2 (76), pp. 85–94. (in Russian)
3. Borisov, M.V., Bakaeva, N.V., Chernyaeva, I.V. *Normativno-tekhnicheskoe regulirovanie v oblasti ozeleneniya gorodskoi sredy* [Normative and technical regulation in urban green space arrangement]. *Vestnik MGSU*, 2020, Vol. 15 (2), pp. 212–222. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2020.2.212-222> (in Russian)
4. Danilina, N.V., Majorzadehzahiri, A. Analysis situation of urban green space framework in Tehran. *Vestnik MGSU*, 2021, vol. 16 (8), pp. 975–985. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2021.8.975-985>
5. D'yachkova, O.N. *Zelenye nasazhdeniya v sisteme blagoustroystva pridoimovykh (privatnykh) territorii mnogokvartirnykh zdaniy* [Green space in the improvement system of adjacent territory (private) areas of apartment buildings]. *Geoekologiya*, 2020, vol. 1, pp. 67–71. <https://doi.org/10.31857/S0869780922010039> (in Russian)
6. D'yachkova, O.N. *Printsipy strategicheskogo planirovaniya razvitiya "zelenoi" infrastruktury gorodskoi sredy* [Strategic planning principles for the development of "green" infrastructure of the urban environment]. *Vestnik MGSU*, 2021, no. 16 (8), pp. 1045–1064. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2021.8.1045-1064> (in Russian)
7. D'yachkova, O.N., Mikhailov, A.E. *Metodika rascheta rekreatsionnoi nagruzki na lokal'nye parki* [Methodology for estimation of recreational load on local parks]. *Biosfernaya sovmestimost': chelovek, region, tekhnologii*, 2022, no. 3, pp. 121–133. <https://doi.org/10.21869/2311-1518-2022-39-3-121-133> (in Russian)
8. Slepnev, M.A., Popov, A.V. *Ekologicheskaya emkost' gorodskikh prirodno-antropogennykh territorial'nykh kompleksov* [Ecological capacity of urban natural and anthropogenic territorial complexes]. *Zhilishchnoe stroitel'stvo*, 2019, no. 3, pp. 57–60. <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2019-3-57-60> (in Russian)
9. Slepnev, M.A., Filyakova, E.I. *Otsenka rekreatsionnoi nagruzki gorodskogo parka kul'tury i otdykha gorod Orel* [Estimation of recreational load of Orel city urban recreational park]. *Biosfernaya sovmestimost': chelovek, region, tekhnologii*, 2019, no 3, pp. 101–110.

- <https://doi.org/10.21869/23-11-1518-2019-27-3-101-110>
(in Russian)
10. Sotnikova, O.A., Bogatova, T.V., Semenova, E.E. *Us-toichivoe razvitiie territorii: sootnoshenie prirodnoi sredy i gorodskoi zastroiki* [Sustainable development of territories: ratio of natural environment to urban development]. *Sotsiologiya goroda*, 2020, no. 3, pp. 30–40. (in Russian)
 11. Arvanitidis, P. Unlocking green space: perceptions and attitudes on various aspects of urban green space. *Green Keys*, 2007. <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.536.6483&rep=rep1&type=pdf>.
 12. Douglas, O., Lennon, M., Scott, M. Green space benefits for health and well-being: a life-course approach for urban planning, design and management. *Cities*. 2017, vol. 66, pp. 53–62. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cities.2017.03.011>
 13. Niemelä, J. Ecology of urban green spaces: the way forward in answering major research questions. *Landscape and Urban Planning*, 2014, vol. 125, pp. 298–303. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2013.07.014>
 14. Noulas, A., Scellato, S., Lambiotte, R., Pontil, M., Mascolo C. A tale of many cities: universal patterns in human urban mobility. *PLoS ONE*, 2012, 7 (5), e37027. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0037027>
 15. Saaty, T.L. Relative measurement and its generalization in decision making. Why pair-wise comparisons are central in mathematics for the measurement of intangible factors. The analytic hierarchy/network process. *RACSAM – Rev. R. Acad. Cien. Serie A. Mat.*, 2008, no. 102 (2), pp. 251–318.
 16. Zhang, L., Cao, H., Han, R. Residents' preferences and perceptions toward green open spaces in an urban area. *Sustainability*, 2021, no. 13, p. 1558. <https://doi.org/10.3390/su13031558>