

Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение

УДК 556.314; 551.34

<https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-2-236-247>

Оригинальная статья

Минеральные лечебные подземные воды Центральной Якутии и перспективы их использования

Н. А. Павлова[✉], В. В. Шепелев, М. В. Данзанова, Л. Д. Иванова, В. А. Ефремова

Институт мерзлотоведения им П. И. Мельникова СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация

[✉]napavlova@mpi.ysn.ru

Аннотация

На основе систематизации и обобщения результатов изучения мерзлотно-гидрогеологических условий Центральной Якутии выявлены закономерности формирования и распространения подмерзлотных гидрокарбонатных и хлоридно-гидрокарбонатных натриевых холодных минеральных вод, а также оценены перспективы их использования в лечебных целях. Установлено, что исследованные маломинерализованные подземные воды являются базовыми аналогами минеральных вод майкопского и карачинского типов без специфических биогенно-активных компонентов. Основными критериями для выделения этих вод как минеральных, помимо минерализации, являются концентрации гидрокарбонатов в пределах 400–1200 мг/дм³, хлоридов – 100–600, сульфатов – 50–250 для карачинского типа и <50 для майкопского типа, натрия – 400–800 мг/дм³, содержание кальция и магния <10 мг/дм³. Формированию гидрокарбонатных и хлоридно-гидрокарбонатных натриевых минеральных вод на исследуемой территории способствуют геокриологические условия, обуславливающие концентрирование составляющих макрокомпонентного состава воды при низких температурах и затрудненном водообмене. Изучение микрокомпонентного состава подмерзлотных вод региона показало, что уровень содержания в них фтора и лития превышает предельно-допустимые концентрации для питьевых вод, но позволяет рассматривать эти воды в качестве лечебных. Подчеркивается необходимость дальнейших биолого-физиологических исследований подмерзлотных вод с повышенным содержанием фтора и лития. Это будет способствовать развитию санаторно-курортного комплекса в Якутии и даст возможность расширить бальнеологический спектр лечения и профилактики заболеваний жителей республики и сопредельных регионов.

Ключевые слова: минеральные воды, мерзлотно-гидрогеологические условия, химический состав, фтор, литий
Финансирование. Работа выполнена в рамках Государственного контракта на выполнение научно-исследовательской работы по теме «Прогноз изменения геокриологических условий и риски освоения криолитозоны (№ 4964 от 6 мая 2022 г.). Использование криогенных ресурсов и ресурсов подземной гидросферы Якутии. 2 этап». Изучение микрокомпонентного состава подмерзлотных вод выполнено в рамках Программы фундаментальных научных исследований ИМЗ СО РАН (регистрационный номер 122012400106-7).

Для цитирования: Павлова Н.А., Шепелев В.В., Данзанова М.В., Иванова Л.Д., Ефремова В.А. Минеральные лечебные подземные воды Центральной Якутии и перспективы их использования. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2023;28(2):236–247. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-2-236-247>

Original article

Mineral medicinal groundwaters in Central Yakutia and prospects for their use

N. A. Pavlova[✉], V. V. Shepelev, M. V. Danzanova, L. D. Ivanova, V. A. Efremova

Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation

[✉]napavlova@mpi.ysn.ru

Abstract

In this study, we reviewed and summarized the data on permafrost and groundwater areas of Central Yakutia to understand the formation and distribution of subpermafrost mineral waters of sodium bicarbonate and chloride-bicarbonate

types, and to evaluate their potential use for medical purposes. Analysis of the data indicated that these low-mineralized groundwaters are basic analogues to the Maykop and Karachi mineral waters, with no particular bioactive components. These mineral water types contain 400 to 1200 mg/dm³ bicarbonates, 100 to 600 mg/dm³ chlorides, 50 to 250 mg/dm³ (Karachi) and <50 mg/dm³ (Maykop) sulfates, 400 to 800 mg/dm³ sodium, and <10 mg/dm³ calcium and magnesium. The formation of sodium bicarbonate and chloride-bicarbonate type water in Central Yakutia is influenced by permafrost which promotes concentration of major chemical components under the cold temperatures and slow groundwater circulation. The study of minor and trace constituents indicates that the subpermafrost waters in the study region contain fluorine and lithium in excess of the drinking water standards but are potentially appropriate for balneotherapy. Further research on the bio-physiological effects of subpermafrost waters with elevated fluorine and lithium concentrations contribute to the development of the spa and health resort industry in Yakutia. Moreover, the study will expand the balneological spectrum of disease prevention and treatment for the benefit of residents of Yakutia and the adjacent regions.

Keywords: mineral water, deposit, permafrost hydrogeology, chemical composition, fluorine, lithium

Funding. This study was conducted under Public Contract “Research Project on Prediction of Permafrost Changes and Risks for Development. Use of Yakutia’s Cryogenic and Groundwater Resources, Stage 2” (number 4964, dt. 06.05.2022). The study of minor and trace constituents of subpermafrost waters was supported by the Program of Foundation Scientific Research at the Melnikov Permafrost Institute of SB RAS (number №122012400106-7).

For citation: Pavlova N.A., Shepelev V.V., Danzanova M.V., Ivanova L.D., Efremova V.A. Mineral medicinal groundwaters in Central Yakutia and prospects for their use. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2023;28(2):236–247. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-2-236-247>

Введение

В Центральной Якутии, большая часть которой находится в пределах Восточно-Сибирской платформы, площадное распространение имеют подмерзлотные водоносные комплексы [1]. Они содержат разные химические типы подземных вод, перспективные для использования в санаторно-курортном деле. Согласно определению В.В. Иванова и Г.А. Невраева [2, 3], «лечебными минеральными водами называются природные воды, которые содержат в повышенных концентрациях те или другие минеральные (реже органические) компоненты и газы и (или) обладают какими-нибудь физическими свойствами (радиоактивность, реакция среды и др.), благодаря чему эти воды оказывают на организм человека лечебное действие в той или иной степени, которое отличается от действий пресной воды» [2, с. 7]. Питьевые минеральные воды с минерализацией менее 1 г/дм³ относят к природным столовым водам, от 1 до 10 г/дм³ – к лечебно-столовым (которые могут быть использованы как столовые напитки при непостоянном употреблении). Минеральные воды с минерализацией более 10 г/дм³ и меньшей при содержании в них определенного количества биологически активных компонентов и соединений относят к лечебным водам, которые используют по назначению врача.

На территории Центральной Якутии с момента первых исследований бальнеологических ресурсов этого региона, начавшихся с изучения оз. Абалах в конце 19 века, к настоящему време-

ни оценены запасы четырех месторождений минеральных подземных вод, различающихся по геохимическим показателям и лечебным свойствам: Верхне-Бестяхское месторождение крепких гидросульфидных лечебных минеральных вод для наружного применения, Абалахское месторождение маломинерализованных гидрокарбонатных натриевых вод для наружного и внутреннего применения, Нюрбинское месторождение питьевых лечебно-столовых среднеминерализованных хлоридных кальциево-натриевых вод и месторождение Ленские зори – питьевых лечебно-столовых маломинерализованных хлоридно-гидрокарбонатных натриевых вод [4–6]. В фондовых материалах геологических предприятий и отдельных публикациях имеются разрозненные сведения и о других проявлениях минеральных подмерзлотных вод, запасы и прогнозные ресурсы которых не оценивались [7–9]. Эти проявления, выявленные попутно при решении задач хозяйственно-питьевого водообеспечения населения, можно рассматривать как перспективные геолого-гидрогеологические объекты.

Геологическое строение и мерзлотно-гидрогеологические условия рассматриваемого региона предопределили широкое распространение в подмерзлотных водоносных комплексах группы минеральных подземных вод, лечебное действие которых определяется ионным составом и минерализацией. В Центральной Якутии наиболее широко эта группа представлена гидрокарбонатными натриевыми и хлоридно-гидро-

карбонатными натриевыми холодными лечебными минеральными подземными водами, которые и явились объектом исследований.

Геологическое строение и геохронологические условия территории

При характеристике геолого-гидрогеологических условий и минеральных вод исследуемого региона, помимо авторских, использованы материалы изысканий геологических организаций, проводивших работы в Центральной Якутии для водоснабжения различных хозяйственных объектов.

Основной гидрогеологической структурой региона является Якутский артезианский бассейн, чехол которого сложен терригенно-карбонатными отложениями палеозойского и мезозойского возрастов. Мощность осадочной толщи достигает 1–4 км и более и сокращается до 538–890 м в районе Якутского сводового поднятия [8, 9]. Регион расположен в области сплошного распространения многолетнемерзлых пород. Глубина залегания их подошвы изменяется от 170 до 600 м, максимальная достигает 885 м на Буотамо-Амгинском междуречье [10]. Значительное снижение мощности мерзлых пород вплоть до образования сквозных таликов отмечается под руслом р. Лена, ее крупными притоками и под отдельными озерами. В соответствии с общим пологим наклоном отложений чехла к внутренней части бассейна, по направлению с юго-востока на север и северо-запад под многолетнемерзлой толщей происходит смена водоносных комплексов. В южной части региона первыми регионально выдержанными водоносными комплексами являются верхнепротерозойский, нижнекембрийский, среднекембрийский, сложенные карбонатными породами. На широте г. Якутск подмерзлотные воды вскрыты скважинами в юрских терригенных отложениях, а севернее развит меловой терригенный водоносный комплекс. Благодаря отсутствию выраженных водоупоров, водоносные комплексы кембрийских и юрских отложений имеют гидравлическую взаимосвязь [9, 11].

В подмерзлотных водоносных горизонтах Центральной Якутии маломинерализованные щелочные гидрокарбонатные и хлоридно-гидрокарбонатные натриевые воды доминируют (см. рисунок). Их минерализация изменяется от 0,7 до 3 г/л, рН варьирует в пределах 7,5–9,3, а температура не превышает 3,5 °С. Воды такого хи-

мического типа вскрыты скважинами как в мезозойских терригенных отложениях, так и в среднекембрийских карбонатных породах.

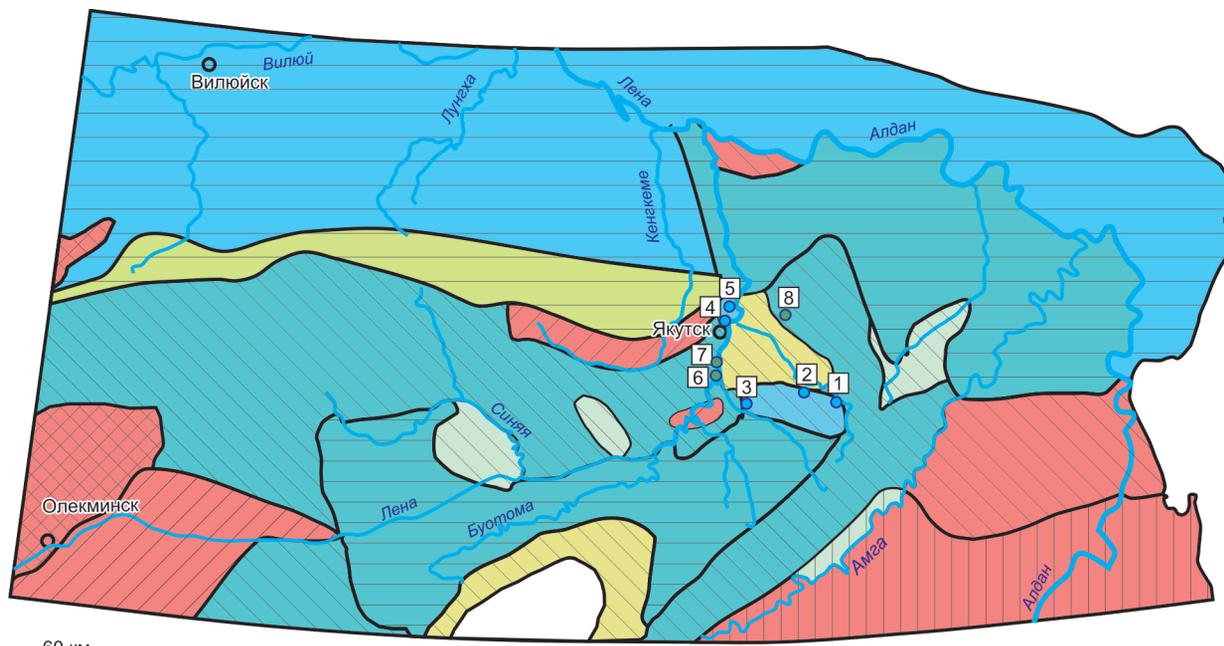
Гидрокарбонатные и хлоридно-гидрокарбонатные натриевые воды Центральной Якутии, согласно действующей классификации [12], могут быть отнесены к минеральным водам майкопского и карачинского типов без специфических биогенно-активных компонентов. Основными критериями для выделения этих вод как минеральных, помимо минерализации, являются концентрации гидрокарбонатов в пределах 400–1200 мг/дм³, хлоридов – 100–600, сульфатов – 50–250 для карачинского типа и <50 для майкопского типа, натрия – 400–800 мг/дм³, содержание кальция и магния <10 мг/дм³.

Формирование и распространение минеральных гидрокарбонатных натриевых подмерзлотных вод

Согласно С.Л. Шварцеву и др. [13], формированию гидрокарбонатных натриевых (содовых) подземных вод способствуют гидролиз алюмосиликатов и испарительное концентрирование, в процессе которых происходит насыщение водного раствора кальцием. С момента достижения равновесия воды с кальцитом последний осаждается в виде карбонатов, а в растворе концентрируется натрий. При гидролизе молекула воды разлагается на ионы Н⁺ и ОН⁻. Первые связываются с глинами, а ионы ОН⁻ в отсутствие углекислоты накапливаются в растворе и способствуют увеличению его рН.

Соодообразование возможно в любых горных породах, которые содержат натрий [14]. В области криолитозоны аналогом испарительного концентрирования является криогенное [15]. В условиях низких температур насыщение маломинерализованных растворов кальцием достигается довольно быстро. Это наглядно подтверждают скопления кальцита на наледях поверхностных вод, а также на ледяных образованиях карстовых карбонатных и гипсовых пещер [16–19]. В результате осаждения кальцита при вымораживании пресного раствора в его химическом составе становятся преобладающими ионы гидрокарбоната и натрия [20, 21].

Обогащение подземных вод ионом натрием и повышение их щелочности может происходить и на стадии деградации многолетнемерзлых пород. Именно протаиванием криогенной толщи Р.С. Кононова объясняет распространение в Центральной Якутии до глубины 2 км маломинерализованных натриевых вод.



Условные обозначения
Conventions

Классификация воды (ГОСТ 54316-2020) Water classification (GOST R 54316-2020)	Минерализация, г/дм ³ Mineralization, g/dm ³	Анионный состав подмерзлотных вод Anionic composition of subpermafrost water				
		HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻ +Cl ⁻	HCO ₃ ⁻ +SO ₄ ²⁻	Cl ⁻ +SO ₄ ²⁻
Пресные Fresh	<1					
Слабуминерализованные Weakly mineralized	1–2					
Маломинерализованные Low mineralized	2–5					
Среднеминерализованные Medium mineralized	5–10					
Высокоминерализованные и рассолы Highly mineralized and brines	>10					

1 2 3

Схематическая гидрохимическая карта подмерзлотных вод Центральной Якутии.

1 – подземные воды в чехле бассейна отсутствуют; 2 – граница площадей с различным химическим составом подземных вод; 3 – участки с выявленными месторождениями и проявлениями минеральных вод: 1 – Абалах, 2 – Табага, 3 – Ломтука, 4 – Марха, 5 – Тулагино, 6 – Якутск (Ленские зори), 7 – Хатассы, 8 – Тюнгиюлю

Schematic hydrochemical map of subpermafrost waters in Central Yakutia.

1 – groundwater is absent in the sedimentary cover; 2 – boundary of areas with different groundwater chemical composition; 3 – sites in proved mineral water deposits and seeps: 1 – Abalakh, 2 – Tabaga, 3 – Lomtuka, 4 – Markha, 5 – Tulagino, 6 – Yakutsk (Lena Dawns), 7 – Khatassy, 8 – Tyungyulu

нерализованных подземных вод с преобладанием натрия [22]. О совместных процессах кальцитизации водовмещающих пород и избирательного концентрирования ионов натрия в подмерзлотных водоносных комплексах Центральной Яку-

тии свидетельствуют включения кальцита в кернах скважин и гидрокарбонатный натриевый состав подземных вод юрских и среднекембрийских водоносных комплексов, ранее подвергшихся многолетнему промерзанию [20, 21].

Впервые подмерзлотные минеральные гидрокарбонатные натриевые (содовые) воды были изучены в котловине термокарстового оз. Абалах. Озеро расположено в Мегино-Кангаласском районе РС(Я), на Лено-Амгинском междуречье, в 85 км на восток от г. Якутск. Скважинами, пробуренными вблизи озера, под толщей многолетнемерзлых пород мощностью 173–260 м в трещиноватых закарстованных карбонатных отложениях среднего кембрия были вскрыты подземные высоконапорные воды [11]. Их статический уровень установился на 7 м выше поверхности земли. Основными ионами, определяющими химический состав и физические свойства воды, являются гидрокарбонат-ионы (HCO_3^-) в концентрации 1013–1049 мг/дм³, содержание хлорид-ионов (Cl^-) изменяется в пределах 71–89 мг/дм³, а сульфат-ионов (SO_4^{2-}) – 12–31 мг/дм³. Из катионов в подмерзлотных водах оз. Абалах преобладают натрий-ионы (Na^+) суммарно с калий-ионами (K^+) в концентрации 408–437 мг/дм³. Содержание ионов магния (Mg^{2+}) и кальция (Ca^{2+}) составляет соответственно 10–11 и 8–14 мг/дм³. Из биологически активных компонентов в воде скважины обнаружены метакремниевая кислота 11–32 мг/дм³ (при кондиции отнесения к минеральным водам 50 мг/дм³). Минеральная вода «Абалахская» по минерализации и основному ионно-солевому составу является маломинерализованной (1,6 г/л) гидрокарбонатной натривой, со слабощелочной реакцией (рН 7,9–8,1).

В соответствии с принятыми критериями оценки, подземная минеральная вода «Абалахская» является аналогом майкопского типа минеральных вод. Согласно бальнеологическому заключению Томского НИИ курортологии и физиотерапии, минеральная вода «Абалахская» рекомендована для питьевого лечения при заболеваниях органов пищеварения: рефлюкс-эзофагите, хронических гастритах с гипо-, нормо- и гиперсекрецией, язвенной болезни желудка и 12-перстной кишки, хроническом холецистите, дискинезии желчевыводящих путей, хроническом панкреатите, синдроме раздраженной кишки [6, 7]. Кроме того, минеральная подземная вода «Абалахская» показана при болезнях эндокринной системы, расстройствах питания и нарушении обмена веществ (сахарный диабет, ожирение, нарушение солевого обмена, нарушение обмена липопротеидов), а также при болезнях мочеполовой системы (хронический пиелонефрит, мочекаменная болезнь, хронический цистит, уретрит,

тригонит). Оцененные запасы Абалахского месторождения минеральных подземных вод составляют 750 м³/сут [11].

Предпосылки наличия минеральных подземных вод этого типа имеются и на смежной территории. Так, у пос. Табага Мегино-Кангаласского района скважиной вскрыты высоконапорные подмерзлотные гидрокарбонатные натриевые воды с минерализацией 0,8–1,3 г/дм³ (табл. 1). Они приурочены к среднекембрийским отложениям, представленным известняками и доломитами. Глубина залегания кровли водоносного комплекса 225 м.

Подземные воды, как и на участке «Абалах», высоконапорные, при их вскрытии скважины самоизливали с дебитом до 4,2 л/с. Содержание в них макроэлементов соответствует кондициям, установленным для лечебно-столовых вод.

Вблизи с. Ломтука (Мегино-Кангаласский район) выявлено месторождение маломинерализованных гидрокарбонатных натриевых минеральных подземных вод. Они залегают в интервале 253–266 м в закарстованных известняках среднекембрийского возраста [5]. По заключению Томского НИИ курортологии и физиотерапии, эти подмерзлотные воды могут быть отнесены к минеральным лечебно-столовым и являются разновидностью минеральных вод майкопского типа. Их выявленные запасы составляют 30 м³/сут.

К проявлениям минеральных вод этого типа можно отнести подземные воды, вскрытые отдельными скважинами в окрестностях г. Якутск в районе Якутского сводового поднятия (п. Марха) и у с. Тулагино. На первом участке при совместном опробовании средне-нижнеюрских водоносных комплексов обнаружены подземные воды с минерализацией 1,2–1,3 г/дм³ [8]. В с. Тулагино в переслаивающихся песчаниках и алевролитах среднеюрского возраста подземные воды имеют минерализацию 1,3–1,5 г/дм³.

Гидрокарбонатный натриевый состав подмерзлотных вод мезозойских водоносных комплексов на этих участках является, вероятно, следствием их взаимодействия с алюмосиликатными минералами водовмещающих отложений. На этот процесс влияет также деградиционное смещение подошвы многолетней мерзлоты в условиях затрудненного водообмена. О последнем свидетельствует дефицит гидростатических давлений в подмерзлотных водоносных комплексах (абсолютные отметки пьезометрического уровня подземных вод близки к нулю или даже отрицательные).

Характеристика подмерзлотных минеральных гидрокарбонатных натриевых вод

Characteristics of subpermafrost mineral sodium bicarbonate water

Участок и индекс водовмещающего комплекса Site and aquifer index	Интервал залегания, м Depth interval, m	Глубина залегания абс. отм. пьезометрического уровня, м Depth of piezometric level, m a.s.l.	Формула ионного состава Ionic composition formula
Абалах Е ₂ Abalakh Е ₂	173–260	$\frac{+7}{165}$	$F_{3,6} Li_{0,6} M_2 \frac{HCO_3(85-88)Cl(10-13)SO_4(1-2)}{(Na+K)(93-94)Mg_{42}Ca(2-3)} pH_{8,0}$
Табага Е ₂ Tabaga Е ₂	225–235	$\frac{+4,5}{165}$	$F_{4,7} Li_{0,5} M_2 \frac{HCO_3 93 Cl 5 SO_4 2}{(Na+K)95 Mg 2 Ca 2} pH_{8,1}$
Ломтука Е ₂ Lomtuka Е ₂	253–266	$\frac{9}{145}$	$Li_{0,4} M_1 \frac{HCO_3 98 Cl 1 SO_4 1}{(Na+K)96 Mg 2 Ca 2} pH_{7,6-8,4} F_{10}$
Марха J ₂₋₁ Markha J ₂₋₁	250–420	$\frac{129}{-31}$	$Li_{0,4} M_1 \frac{HCO_3 82 Cl 15 SO_4 1}{(Na+K)100} pH_{9,0} F_{11}$
Тулагино J ₂ Tulagino J ₂	380–500	$\frac{123}{-27}$	$Li_{0,3} M_1 \frac{HCO_3(81-85)Cl(12-15)}{(Na+K)99} pH_{7,9-8,4} F_{10}$

Формирование и распространение хлоридно-гидрокарбонатных натриевых подмерзлотных вод

Хлоридно-гидрокарбонатные натриевые воды изучены в районе Табагинского мыса р. Лена вблизи г. Якутск. Проявления их отмечены и на правобережье р. Лена. Подземные воды приурочены к нижнеюрскому водоносному комплексу, сложенному трещиноватыми песчаниками и алевролитами. Залегающие под многолетнемерзлыми породами подземные воды по химическим показателям близки к карачинскому типу.

В районе Табагинского мыса хлоридно-гидрокарбонатные натриевые подмерзлотные воды с минерализацией 1,7 г/дм³ вскрыты скважиной в интервале глубин 240–310 м (табл. 2). Месторождение минеральных вод, получившее наименование «Ленские зори», расположено в области межфациальных перетоков подземных вод из

среднекембрийского водоносного комплекса в нижнеюрский. В геолого-тектоническом отношении оно находится в зоне влияния сейсмоактивного Табагинского сдвига, пересекающего Якутский разлом [23]. На участке пересечения Табагинского разлома и р. Лена бурением достоверно установлено наличие сквозного подруслового талика [8]. Минерализация подземных вод в талике возрастает по разрезу, от 0,6 г/дм³ в кровле нижнеюрского водоносного комплекса до 1,3 г/дм³ в нижнекембрийском водоносном комплексе. С глубиной анионный состав воды изменяется в отложениях юры от гидрокарбонатного до хлоридно-гидрокарбонатного, в кембрийском водоносном комплексе он гидрокарбонатно-хлоридный. Среди катионов, независимо от литологии и возраста пород, в подземных водах сквозного талика преобладают ионы натрия, доля их с глубиной увеличивается от 81 до 98 % экв.

**Характеристика подмерзлотных
минеральных хлоридно-гидрокарбонатных натриевых вод**

Table 2

Characteristics of subpermafrost mineral sodium chloride-bicarbonate water

Участок и индекс водовмещающего комплекса Site and aquifer index	Интервал залегания, м Depth interval, m	Глубина залегания абс. отм. пьезометрического уровня, м Depth of piezometric level, m a.s.l.	Формула ионного состава Ionic composition formula
Якутск (Ленские зори) J ₁ Yakutsk (Lena Dawns) J ₁	240–310	$\frac{57,5}{47}$	F5,3 Li0,4 M ₂ $\frac{\text{HCO}_3,47\text{Cl}44\text{CO}_3,5\text{SO}_4,4}{(\text{Na} + \text{K})99\text{Mg}1}$ pH8,9
Хатассы J ₁ -C ₂ Khatassy J ₁ -C ₂	305–400	$\frac{53}{40}$	F4,8 Li0,4 M ₁ $\frac{\text{HCO}_3,51\text{Cl}25\text{SO}_4,22}{(\text{Na} + \text{K})92\text{Mg}4\text{Ca}4}$ pH8,4
Хатассы J ₁ Khatassy J ₁	260–290	$\frac{27}{70}$	F3,8 Li0,4 M ₁ $\frac{\text{HCO}_3,45\text{Cl}30\text{SO}_4,25}{(\text{Na} + \text{K})90\text{Mg}6\text{Ca}4}$ pH7,1
Тюнгюлю J ₁ Tyungyulu J ₁	470–500	$\frac{171}{-33}$	F8,0 Li0,3 M ₂ $\frac{\text{HCO}_3,57\text{Cl}38\text{CO}_3,5}{(\text{Na} + \text{K})99\text{Mg}1}$ pH8,2

Сходный химический состав подрусловых вод и подмерзлотных вод, вскрытых вблизи р. Лена, позволяет утверждать о большой (не исключено, что ведущей) роли тектонической и мерзлотно-геологической обстановки в районе Табагинского мыса в формировании месторождения «Ленские зори».

Минеральная вода месторождения пригодна к лечебному (внутреннему) применению и может использоваться для профилактики и лечения широкого спектра заболеваний мочеполовой и эндокринной систем, а также органов пищеварения. Утвержденная величина запасов минеральных подземных вод месторождения «Ленские зори» с учетом промышленного их разлива и санаторного лечебно-профилактического потребления позволяет организовать производство с мощностью выпускаемой продукции до 100 м³/сут [11].

К перспективным для выявления минеральных хлоридно-гидрокарбонатных натриевых вод от-

носится территория с. Хатассы вблизи г. Якутск. Здесь в гидравлически связанных нижнеюрском и среднекембрийском водоносных горизонтах, представленных песчаниками и известняками, содержатся подмерзлотные воды с минерализацией 1,1–1,3 г/дм³ с кондиционными концентрациями макрокомпонентов.

Аналогом минеральных вод карачинского типа могут быть подземные воды, вскрытые скважиной вблизи озерной котловины оз. Тюнгюлю на правом берегу р. Лена в отложениях нижнеюрского возраста. Водоносный горизонт сложен песчаниками с прослоями алевролита и бурого угля. Площадь, на которой выявлены хлоридно-гидрокарбонатные натриевые воды, приурочена к узлу пересечения активных сдвиговых деформаций пород Нижнеалданской впадины с Кангаласским разломом [23]. Для оценки ресурсов подмерзлотных вод на этих участках и получения заключения об их бальнеологической ценности требуются дополнительные исследования.

Микрокомпонентный состав подмерзлотных минеральных вод

В подмерзлотных водах гидрокарбонатного и хлоридно-гидрокарбонатного натриевого состава Центральной Якутии присутствуют микроэлементы, концентрации которых превышают предельно-допустимые для питьевых вод, но позволяют рассматривать эти воды в качестве лечебных. Одним из таких активных биоэлементов является фтор. Этот галоген в детском возрасте необходим для своевременной минерализации зубов и костей, в дальнейшем – для профилактики остеопороза. Суточная потребность организма человека во фторе составляет 0,03 мг/кг массы тела для взрослого и 0,15–0,1 мг/кг для детей. Согласно современным требованиям, в лечебно-столовых минеральных водах с общей минерализацией 1–10 г/дм³ норма массовой концентрации фтора составляет 1,5–10 мг/дм³, а в лечебных минеральных – 10–15 мг/дм³ [24].

В водный раствор фтор поступает из горных пород. Основными его источниками являются минералы селлаит, слюда, флюорит, криолит, фтор-апатит, которые обогащают подземные воды фтористыми соединениями. Установлено, что в щелочных условиях и диапазоне минерализации воды от 0,7 до 1,7 г/дм³ скорость растворения фторидных минералов возрастает [25, 26], а преобладание в воде кальция среди катионов подавляет их растворимость [27, 28].

В Центральной Якутии в подмерзлотных водах, приуроченных к отложениям нижней и средней юры, содержание фтора в целом изменяется от 4,1 до 11,7 мг/дм³. Локальное повышение его содержания в воде (до 9,0–15,5 мг/дм³) зафиксировано в районе выступа кристаллического фундамента Якутского сводового поднятия [29]. Минерализация подземных вод юрских отложений 0,9–1,5 мг/дм³, химический состав преимущественно гидрокарбонатно-натриевый. По величине рН это слабо- и умеренно-щелочные воды. В подмерзлотных водах юрских водоносных комплексов доля кальция, который мог бы образовывать со фтором вторичные минералы, редко достигает 2 %. Ранее было показано, что в этом регионе геохимические условия, благоприятные для извлечения фтора из водовмещающих пород и аккумуляции его в растворе, формируются в процессе криогенного метаморфизма подземных вод и водовмещающих пород [29, 30].

В санаторном лечении целенаправленно фтористые минеральные воды как ведущий лечебный

фактор, как правило, не применяются. Тем не менее, курсовой прием такой воды может оказывать терапевтический эффект. В России наиболее известные минеральные питьевые воды, обогащенные фтором, выпускаются под марками «Ессентуки 4» (3 мг/дм³), «Ессентуки 17» (2), «Рычал-Су» (4), «Славяновская» (3 мг/дм³), «Смирновская» (2 мг/л), Белокуринские воды с содержанием фтора до 14 мг/л используются для наружного применения и ирригаций [31].

Другим жизненно важным элементом, высокие концентрации которого характерны для гидрокарбонатных натриевых подмерзлотных вод Центральной Якутии, является литий [8, 32]. Недостаток его в организме человека – одна из причин психических, неврологических, некоторых злокачественных патологий [33–35]. Избыток лития приводит к поражению почек, сердечно-сосудистой системы и щитовидной железы. Адекватный уровень потребления лития составляет 100 мкг, а верхний допустимый предел – 300 мкг [36]. Диапазон безвредной концентрации этого элемента в минеральных водах не установлен. В настоящее время для лечения неврологических расстройств часто используют литиевые препараты, как альтернативу им можно рассмотреть минеральные воды, обогащенные этим элементом.

Источником поступления лития в подземные воды могут быть растворы древних морских бассейнов, захороненные в процессе седиментогенеза, и горные породы. Содержание лития в морской воде около 0,15–0,2 мг/дм³. В горных породах наибольшие концентрации лития отмечаются в глинистых разностях и продуктах их метаморфизма (0,0054 и 0,0038 % соответственно), а также кислых изверженных породах (0,0034 %) [37]. В минералах глины он присутствует в основном в виде изоморфной примеси. В кислых изверженных породах главным концентратором и носителем лития является биотит, в меньшей степени – мусковит и сподумен. Эндогенные литиевые минералы в условиях гипергенеза и гидротермальных процессов легко изменяются, и литий выносятся с водами и расщивается.

В Центральной Якутии в юрских водоносных комплексах подмерзлотные воды гидрокарбонатно-натриевого состава содержат литий в количестве от 0,07 до 0,68 мг/л (ПДК для питьевых вод 0,03 мг/л) [32]. В карбонатных водоносных комплексах концентрация лития в подземных

водах изменяется от 0,6 до 1,2 мг/дм³. Несомненно, предполагаемая бальнеологическая ценность подмерзлотных минеральных вод с повышенным содержанием лития должна быть предварительно подтверждена биолого-физиологическими исследованиями. Так, по данным А.Н. Васильева и В.Г. Амелина, содержание лития в минеральных водах кавказского региона «Ессентуки 4», «Ессентуки 17» и «Рычал Су» составляет 1,0–1,6 мг/дм³, но токсического воздействия ее на организм человека не зафиксировано [38].

Заключение

В Центральной Якутии в водоносных горизонтах, залегающих под толщей многолетнемерзлых пород, широко распространены холодные гидрокарбонатные и хлоридно-гидрокарбонатные натриевые воды, которые являются базовыми аналогами минеральных вод майкопского и карачинского типов. Формированию их во многом способствуют мерзлотно-геокриологические условия, обуславливающие концентрирование составляющих макрокомпонентного состава воды при низких температурах и затрудненном водообмене. Анализ геокриологических, гидрогеологических и гидрогеохимических условий указывает на высокую перспективность обнаружения месторождений минеральных подземных вод в регионе.

Наряду с рассмотрением подмерзлотных вод как минеральных, бальнеологическое действие которых определяется ионным составом и минерализацией, стоит оценить их как фтористые и литиевые подземные минеральные воды. Это будет способствовать развитию санаторно-курортного комплекса в Якутии и даст возможность расширить бальнеологический спектр лечения и профилактики заболеваний жителей республики и сопредельных регионов.

Необходимо отметить, что спрос местного населения на профилактическое и реабилитационное лечение сегодня достаточно большой и намного превышает возможности имеющейся в республике санаторно-курортной базы. Это можно объяснить тем, что в существующих геополитических и социально-экономических реалиях бывшие советские здравницы, располагавшиеся в Грузии, Молдавии, Средней Азии, Прибалтике, стали труднодоступны для многих. Кроме того, люди все больше стали осознавать преимущества отдыха и лечения в местных оздоровительных учреждениях. В этом случае не про-

исходят нарушения биологических ритмов в организме человека, психологические и адаптационные перегрузки, вызываемые при дальних поездках, резкой смене климата и привычного пищевого рациона. Следует подчеркнуть, что существенным преимуществом бальнеологических ресурсов нашей республики является их экологичность, что, безусловно, повышает интерес к местным здравницам.

Список литературы / References

1. Шепелев В.В., Толстихин О.Н., Пигузова В.М. и др. *Мерзлотно-гидрогеологические условия Восточной Сибири*. Новосибирск: Наука; 1984. 192 с.
Shepelev V.V., Tolstikhin O.N., Piguzova V.M. et al. *Permafrost-hydrogeological conditions of Eastern Siberia*. Novosibirsk: Nauka; 1984. (In Russ.)
2. Иванов В.В., Невраев Г.А. *Классификация подземных минеральных вод*. М.: Недра; 1964. 168 с.
Ivanov V.V., Nevraev G.A. *The classification of underground mineral water*. Moscow: Nedra; 1964. (In Russ.)
3. Иванов В.В. *Основные критерии оценки химического состава минеральных вод. Методические рекомендации*. М.: Центрсоветкурорт; 1982. 93 с.
Ivanov V.V. *The main criteria for assessing the chemical composition of mineral water. Guidelines*. Moscow: Tsentrsovetkurort; 1982. (In Russ.)
4. Трофимова Т.П. История исследования, химический состав воды и грязи озера Абалах. *Международный научный институт «Educatio»*. 2015;П(9):72–75.
Trofimova T.P. History of research, chemical composition of water and mud of Lake Abalakh. *International Scientific Institute "Educatio"*. 2015.П(9):72–75. (In Russ.)
5. Скутин В.И., Тихонов Д.Г. Минеральные воды Якутии и перспективы их использования в лечебно-оздоровительных целях. *Актуальные проблемы курортологии. Профилактика, реабилитация и восстановительное лечение на Крайнем Севере: материалы конференции, 2005*. 2005:102–106.
Skutin V.I., Tikhonov D.G. Mineral water and prospects for their use for health-improving purposes in Yakutia. *Actual problems of balneology. Prevention, rehabilitation and rehabilitation treatment in the Far North: proceedings of the conference, 2005*. 2005:102–106. (In Russ.)
6. Сафонова С.Л., Емельянова Э.А., Платонова А.А., Филиппов А.А. *Минеральная вода «Абалахская» как природный фактор в терапии заболеваний органов пищеварения*. Якутск: Издательский дом СВФУ; 2012. 132 с.
Safonova S.L., Emelyanova E.A., Platonova A.A., Filippov A.A. *Mineral water "Abalakhskaya" as a natural factor in the treatment of digestive system diseases*. Yakutsk: NEFU Publishing House; 2012. (In Russ.)
7. Шепелев В.В., Черепанова А.П., Дмитриева Т.Г. О состоянии и перспективах развития санаторно-ку-

портной базы в Якутии за счет использования минеральных лечебных подземных вод. *Якутский медицинский журнал*. 2009;4(28):84–86.

Shepelev V.V., Cherepanova A.P., Dmitrieva T.G. Status and prospects of sanatorium and resort base in Yakutia by the use of mineral medical groundwaters. *Yakut Medical Journal*. 2009;4(28):84–86. (In Russ.)

8. Балобаев В.Т., Иванова Л.Д., Никитина Н.М. и др. *Подземные воды Центральной Якутии и перспективы их использования*. Новосибирск: Филиал ГЕО Изд-ва СО РАН; 2003. 174 с.

Balobaev V.T., Ivanova L.D., Nikitina N.M. et al. *Groundwaters in Central Yakutia and prospects of their use*. Novosibirsk: Publishing House of SB RAS “Geo”; 2003. (In Russ.)

9. Шепелев Н.Г., Макогонова О.В. Моделирование гидрогеологических условий подмерзлотного водоносного комплекса для территории г. Якутска. *Наука и образование*. 2010;2(58):21–26.

Shepelev N.G., Makogonova O.V. Modeling of hydrogeological conditions of subpermafrost aquifer for the Yakutsk city area. *Nauka i obrazovaniye*. 2010;2(58):21–26. (In Russ.)

10. Иванова Л.Д., Никитина Н.М. Об уточнении схемы мерзлотно-гидрогеологического районирования в южной части Якутского артезианского бассейна. *Криосфера Земли*. 2000;IV(2):52–56.

Ivanova L.D., Nikitina N.M. On the refinement of the scheme of permafrost-hydrogeological zoning in the southern part of the Yakutsk artesian basin. *Earth's Cryosphere*. 2000; IV(2):52–56. (In Russ.)

11. Федоров А.А., Федоров М.А. Особенности изучения и использования минеральных вод Центральной Якутии. *XXI Совецание по подземным водам Сибири и Дальнего Востока с международным участием: материалы Всероссийского совещания по подземным водам Востока России, 25–28 июня 2015 г.* 2015:177–180.

Fedorov A.A., Fedorov M.A. Features of the study and use of mineral waters in Central Yakutia. *21th conference on groundwater in Siberia and Far East with international participation: Proceedings of the National conference on groundwater in Eastern Russia, June 22–28 2015*. 2015:177–180. (In Russ.)

12. ГОСТ Р 54316-2020 *Воды минеральные природные питьевые. Общие технические условия*. М.: Стандартинформ; 2020. 49 с.

GOST R 54316-2020 *Drinking natural mineral waters. General specifications*. Moscow: Standartinform; 2020. (In Russ.)

13. Шварцев С.Л., Рыженко Б.Н., Алексеев В.А. и др. *Геологическая эволюция и самоорганизация системы вода – порода. Т. 2: Система вода – порода в условиях зоны гипергенеза*. Новосибирск: СО РАН; 2007. 389 с.

Shvartsev S.L., Ryzhenko B.N., Alekseyev V.A. et al. *Geological evolution and self-organization of the water –*

rock system. Vol. 2: The water – rock system under conditions of hypergenesis. Novosibirsk: Publishing House of SB RAS; 2007. (In Russ.)

14. Шварцев С.Л. *Гидрогеохимия зоны гипергенеза*. М.: Недра; 1998. 366 с.

Shvartsev S.L. *Hydrogeochemistry of the hypergenesis zone*. Moscow: Nedra; 1998. (In Russ.)

15. Комаров И.А. *Термодинамика и теплообмен в дисперсных мерзлых породах*. М.: Научный мир; 2003. 608 с.

Komarov I.A. *Thermodynamics and heat and mass transfer in dispersed frozen rocks*. Moscow: Nauchnyy mir; 2003. (In Russ.)

16. Richter D.K., Meissner P., Immenhauser A., Schulte U., Dorsten I. Cryogenic and non-cryogenic pool calcites indicating permafrost and non-permafrost periods: A case study from the Herbstlabyrinth-Advent Cave system (Germany). *The Cryosphere*. 2010;4(4):501–509. <https://doi.org/10.5194/tc-4-501-2010>

17. Кадебская О.И., Чайковский И.И. Минеральные образования пещеры Победа (Башкортостан), связанные с формированием и оттаиванием многолетнего льда. *Известия РАН. Серия географическая*. 2014;3:66–72. <https://doi.org/10.15356/0373-2444-2014-3-66-72>

Kadebskaya O.I., Chaikovskiy I.I. Mineral formations of Pobeda cave (Bashkortostan) associated with the formation and thawing of multi-year ice *Izvestiya RAN. Seriya Geograficheskaya*. 2014;3:66–72. (In Russ.) <https://doi.org/10.15356/0373-2444-2014-3-66-72>

18. Базарова Е.П., Кадебская О.И., Цурихин Е.А. Криогенные минералы пещер р. Вижай (Северный Урал). *Вестник Пермского университета. Геология*. 2018;17(1):11–17. <https://doi.org/10.17072/psu.geol.17.1.11>

Bazarova E.P., Kadebskaya O.I., Tsurikhin E.A. Cryogenic Minerals in Caves of the Vizhay River (Northern Urals). *Bulletin of Perm State University. Geology*. 2018;17(1):11-17. (In Russ.). <https://doi.org/10.17072/psu.geol.17.1.11>

19. Munroe J., Kimble K., Spötl C. et al. Cryogenic cave carbonate and implications for thawing permafrost at Winter Wonderland Cave, Utah, USA. *Scientific Reports*. 2021;11(1):6430. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-85658-9>

20. Анисимова Н.П. *Криогидрогеохимические особенности мерзлой зоны*. Новосибирск: Наука; 1981. 153 с.

Anisimova N.P. *Cryohydrogeochemical features of the frozen zone*. Novosibirsk: Nauka; 1981. (In Russ.)

21. Фотиев С.М. *Криогенный метаморфизм пород и подземных вод (условия и результаты)*. Новосибирск: Академическое изд-во «Гео»; 2009. 279 с.

Fotiyev S.M. *Cryogenic metamorphism of rocks and groundwater (conditions and results)*. Novosibirsk: Academic Publishing House “Geo”; 2009. (In Russ.)

22. Кононова Р.С. Гидрохимическая зональность подземных вод как один из показателей палеомерз-

лотных условий. II Международная конференция по мерзлотоведению. Доклады и сообщения. 1973;5:90–94.

Kononova R.S. Hydrochemical zoning of groundwater as one of the indicators of paleo-permafrost conditions. 2nd International Conference on Permafrost. Reports and communications. 1973;5:90–94. (In Russ.)

23. Имаев В.С., Имаева Л.П., Козьмин Б.М., Петров А.Ф., Шибаев С.В., Гриб Н.Н., Колодезников И.И. Возможности оценки сейсмической опасности природного и техногенного риска агломерации «Большого Якутска». Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2018;26(4):16–29. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2018-26-4-16-29>

Imaev V.S., Imaeva L.P., Kozmin B.M., Petrov A.F., Shibaev S.V., Grib N.N., Kolodeznikov I.I. Possibilities of seismic danger estimation of natural and technogenic risk of «Yakutsk City» agglomeration. Arctic and Subarctic Natural Resources. 2018;26(4):16–29. (In Russ.). <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2018-26-4-16-29>.

24. Технический регламент Евразийского экономического союза «О безопасности упакованной питьевой воды, включая природную минеральную воду» (ТР ЕАЭС 044/2017). URL: <https://docs.cntd.ru/document/456090353>.

EAEU Technical Regulation on Safety of Packaged Potable Water Including Natural Mineral Water” (TR EAEU 044/2017). (In Russ.). URL: <https://docs.cntd.ru/document/456090353>

25. Saxena V., Ahmed S. Dissolution of fluoride in groundwater: a water-rock interaction study. Environmental Geology. 2001;40:1084–1087. <https://doi.org/10.1007/s002540100290>

26. Савенко А.В., Савенко В.С. Экспериментальное изучение мобилизации фтора из магматических горных пород. Геохимия. 2020;65(12):1245–1248. <https://doi.org/10.31857/S0016752520090101>

Savenko A.V., Savenko V.S. Experimental study of fluorine mobilization from igneous rocks. Geochemistry International. 2020;58(12):1386–1389. <https://doi.org/10.31857/S0016752520090101>

27. Посохов Е.В. По поводу статьи А.А. Алексева «Фтор в акротермах». Геохимия. 1957;4:346–347.

Posokhov E.V. Regarding the article by A.A. Alekseev «Fluorine in acrotherms». Geochemistry International. 1957;4:346–347. (In Russ.)

28. Крайнов С.Р., Швец В.М. Геохимия подземных вод хозяйственно-питьевого назначения. М.: Недра; 1987. 237 с.

Krainov S.R., Shvets V.M. Geochemistry of technical and drinking groundwater. Moscow: Nedra; 1987. (In Russ.)

29. Павлова Н.А., Федорова С.В. Особенности распределения фтора в подмерзлотных водах Центральной Якутии. Криосфера Земли. 2022;XXVI(2):41–50 <https://doi.org/10.15372/KZ20220203>

Pavlova N.A., Fedorova S.V. Fluoride distribution in subpermafrost groundwater in Central Yakutia. Earth's Cryosphere, 2022;XXVI(2):34–41. <https://doi.org/10.15372/KZ20220203>

30. Анисимова Н.П., Павлова Н.А. Гидрогеохимические исследования криолитозоны Центральной Якутии. Новосибирск: Академическое изд-во «Гео»; 2014. 189 с.

Anisimova N.P., Pavlova N.A. Hydrogeogochemical studies of permafrost in Central Yakutia. Novosibirsk: Academic Publishing House “Geo”; 2014. 189 p. (In Russ)

31. Барышников Г.Я., Елисеев В.А. Фтористые минеральные воды Сибири и их бальнеологическая значимость. География и природопользование Сибири. 2009;11:19–24.

Baryshnikov G.Ya., Eliseev V.A. Fluorine mineral waters of Siberia and their balneological significance. Geography and nature management in Siberia. 2009;11:19–24. (In Russ)

32. Федорова С.В., Павлова Н.А. Особенности распределения лития в подмерзлотных водах Центральной Якутии. Подземная гидросфера: Материалы XXIII Всероссийского совещания по подземным водам востока России с международным участием, 21–26 июня 2021. 2021:304–307 <https://doi.org/10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-304-307>

Fedorova S.V., Pavlova N.A. Distribution of lithium in subpermafrost waters in Central Yakutia. Underground hydrosphere: Proceedings of the 23rd National conference on groundwater in Eastern Russia with international participation, June 21–26, 2021. 2021:304–307. (In Russ.). <https://doi.org/10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-304-307>

33. Шестопалов В.М., Моисеева Н.П., Моисеев А.Ю. Минеральные воды Украины с повышенным содержанием бальнеологически активных микроэлементов. Геологический журнал. 2008;3:84–94.

Shestopalov V.M., Moiseeva N.P., Moiseev A.J. Mineral waters of Ukraine with the promoted maintenance of balneological active microelements. Geologicheskij zhurnal. 2008;3:84–94. (In Russ.)

34. Ерлыкина Е.И., Обухова Л.М., Алясова А.В., Горшкова Т.Н., Французова В.П. Литий как фактор сопряжения нарушений минерального и углеводного гомеостаза при злокачественных новообразованиях эпителиальных тканей. Злокачественные опухоли. 2014;4(11):10–18. <https://doi.org/10.18027/2224-5057-2014-4-10-18>

Erlykina E.I., Obukhova L.M., Alyasova A.V., Gorskova T.N., Frantsuzeva V.P. Lithium as a coupling factor of mineral and glucose homeostasis disorders in malignant tumors of epithelial tissues. Malignant tumors. 2014;4(11):10–18 (In Russ). <https://doi.org/10.18027/2224-5057-2014-4-10-18>.

35. Беккер Р.А., Быков Ю.В. Препараты лития в психиатрии, наркологии и неврологии. Часть II. Биохимическая. Acta Biomedica Scientifica. 2019;4(2):80–100. <https://doi.org/10.29413/ABS.2019-4.2.13>

Bekker R.A., Bykov Yu.V. lithium preparations in psychiatry, addiction medicine and neurology. part II. biochemical mechanisms of its action. *Acta Biomedica Scientifica*. 2019;4(2):80–100. (In Russ). <https://doi.org/10.29413/ABS.2019-4.2.13>

36. Гальченко А.В., Шерстнева А.А. Условно-эссенциальные ультрамикроэлементы в питании вегетарианцев и веганов: никель, литий, ванадий, германий. *Микроэлементы в медицине*. 2021;22(2):3–16 <https://doi.org/10.19112/2413-6174-2021-22-2-3-16>

Galchenko A.V., Sherstneva A.A. Conditionally essential ultra-trace elements in nutrition of vegetarians and vegans. Nickel, lithium, vanadium, germanium. *Trace Elements in Medicine*. 2021;22(2):3–16. (In Russ.). <https://doi.org/10.19112/2413-6174-2021-22-2-3-16>

37. Григорьев Н.А. Распределение лития и литиевых максиминалов в верхней части континентальной коры. *Литосфера*. 2008;3:112–120.

Grigoriev N.A. Distribution of lithium and lithium maximinerals in the upper part of the continental crust. *Lithosphere*. 2008;3:112–120. (In Russ.)

38. Васильев А.Н., Амелин В.Г. Исследование индикаторных свойств химических элементов, отвечающих особенностям геохимии сред формирования природных минеральных вод. *Георесурсы*. 2016;18(2):133–137. <https://doi.org/10.18599/grs.18.2.11>

Vasilyev A.N., Amelin V.G. Study of indicator properties of chemical elements, corresponding to geochemical environment of natural mineral water formation. *Georesursy=Georesources*. 2016;18(2):133–137. (In Russ.). <https://doi.org/10.18599/grs.18.2.11>

Об авторах

ПАВЛОВА Надежда Анатольевна, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0001-5473-7778>, ResearcherID: W-2163-2018, Scopus AuthorID: 70878, e-mail: napavlova@mpi.ysn.ru

ШЕПЕЛЁВ Виктор Васильевич, доктор геолого-минералогических наук, профессор, главный научный сотрудник, ResearcherID: P-8179-2018, Scopus AuthorID: 58611, e-mail: sheply@mpi.ysn.ru

ДАНЗАНОВА Марина Викторовна, кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-2559-7590>, ResearcherID: AAC-8680-2019, Scopus AuthorID: 652603, e-mail: dmv_1585@mail.ru

ИВАНОВА Лена Дмитриевна, ведущий инженер, Scopus AuthorID: 63440, e-mail: ldivanova@mpi.ysn.ru

ЕФРЕМОВА Вилена Альбертовна, младший научный сотрудник, Scopus AuthorID: 1179502, e-mail: efremovavilena@gmail.com

About the authors

PAVLOVA, Nadezhda Anatolievna, Cand. Sci. (Geol. and Mineral.), Leading Researcher, <https://orcid.org/0000-0001-5473-7778>, ResearcherID: W-2163-2018, Scopus AuthorID: 70878, e-mail: napavlova@mpi.ysn.ru

SHEPELEV, Viktor Vasilievich, Dr. Sci. (Geol. and Mineral.), Professor, Chief Researcher, <https://orcid.org/0000-0003-3434-6969>, ResearcherID: P-8179-2018, Scopus AuthorID: 58611, e-mail: sheply@mpi.ysn.ru

DANZANOVA, Marina Viktorovna, Cand. Sci. (Geol. and Mineral.), Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-2559-7590>, ResearcherID: AAC-8680-2019, Scopus AuthorID: 652603, e-mail: dmv_1585@mail.ru

IVANOVA, Lena Dmitrievna, Senior Technical Assistant, Scopus AuthorID: 63440, e-mail: ldivanova@mpi.ysn.ru

EFREMOVA, Vilena Albertovna, Junior Researcher, Scopus AuthorID: 1179502, e-mail: efremovavilena@gmail.com

Поступила в редакцию / Submitted 18.04.2023

Поступила после рецензирования / Revised 17.05.2023

Принята к публикации / Accepted 23.05.2023