

ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ФТОРА В ПОДМЕРЗЛОТНЫХ ВОДАХ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЯКУТИИ

Н.А. Павлова, С.В. Федорова

*Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН,
677010, Якутск, ул. Мерзлотная, 36, Россия; na-pavlova@yandex.ru, veta_f@mail.ru*

Изучено распределение фтора в пресных и слабоминерализованных подмерзлотных водах Центральной Якутии. Основой для исследования послужили результаты анализов 296 водных проб, отобранных сотрудниками Института мерзлотоведения СО РАН в процессе выполнения гидрохимических работ в 1984–2019 гг. Установлено, что в подмерзлотных водоносных горизонтах среднее содержание фтора составляет 5–10 мг/л. Максимально (до 15.5 мг/л) насыщены этим элементом подмерзлотные воды терригенных водоносных комплексов, залегающие на породах кристаллического фундамента. Источником фтора, очевидно, являются различные фторсодержащие минералы алюмосиликатных пород. Ключевым фактором для накопления его в подмерзлотных водах выступает геохимическая среда (щелочные условия и гидрокарбонатно-натриевый состав воды), которая формируется в процессе криогенного метаморфизма подземных вод и водовмещающих пород. Минимальные концентрации фтора (от 0.4–0.8 до 2–3 мг/л) отмечены в подмерзлотных водах, отобранных из скважин вблизи русла р. Лена. Низкое содержание фтора на таких участках косвенно свидетельствует о наличии подрусловых сквозных таликовых зон и инфильтрации речных вод в подмерзлотные водоносные горизонты.

Ключевые слова: Якутский артезианский бассейн, подмерзлотные воды, многолетнемерзлые породы, зона затрудненного водообмена, химический состав, фтор.

FLUORIDE DISTRIBUTION IN SUBPERMAFROST GROUNDWATER, CENTRAL YAKUTIA

N.A. Pavlova, S.V. Fedorova

*Melnikov Permafrost Institute, SB RAS,
Merzlotnaya str. 36, Yakutsk, 677010, Russia; na-pavlova@yandex.ru*

We studied the distribution of fluoride (F^-) in fresh and moderately mineralized waters of subpermafrost aquifers of Central Yakutia. We analyzed the data archive of 296 water samples collected by the Melnikov Permafrost Institute staff members during hydrochemical surveys between 1984 and 2019. The average fluoride concentrations varied between 5 and 10 mg/L. Highest concentrations (up to 15.5 mg/L) are observed in waters of the terrigenous aquifer systems occurring over the crystalline basement. The sources of fluoride can likely be the various fluoride-bearing minerals of aluminosilicate rocks. The high fluoride concentrations in these aquifers are associated with geochemistry (alkaline environment and sodium-bicarbonate water type) resulted from cryogenic metamorphism of rocks. Lowest concentrations (0.4–0.8 to 2–3 mg/L) are observed in subpermafrost groundwater samples collected from wells near the Lena River channel. These low concentrations indirectly indicate the presence of open taliks beneath the channel and the infiltration of stream water into the subpermafrost aquifers.

Key words: Yakutsk artesian basin, subpermafrost water, permafrost, low groundwater circulation zone, chemical composition, fluoride.

ВВЕДЕНИЕ

В Центральной Якутии в области сплошной криолитозоны потребности в питьевой воде покрываются в основном за счет ресурсов поверхностных вод, реже используются воды гидрогенных таликов, а также подмерзлотные воды. Одним из показателей качества природных вод является содержание в ней фтора. Оптимальное содержание F определено в количестве 0.5–1.0 мг/л при предельно допустимом 1.2–1.5 мг/л [Донских, 2013; Fordyce et al., 2007; Ozsvath, 2009; WHO..., 2017; Yousefi et al., 2019]. Длительное потребление воды с концентрацией фтора более 1.5 мг/л оказы-

вает токсическое воздействие на костно-мышечную, нейроэндокринную и сердечно-сосудистую системы, а при содержании менее 0.5–0.6 мг/л развивается кариес зубов [Донских, 2013; Brindha, Elango, 2011].

В водный раствор фтор поступает из горных пород. В них он чаще всего встречается в виде минералов селлаита (MgF_2), флюорита или плавикового шпата (CaF_2), криолита (Na_3AlF_6), фторапатита ($Ca_5(PO_4)_2F$). Среднее содержание фтора в литосфере оценивается в 400–800 мг/кг [Вернадский, 1955; Янин, 2007]. Наиболее обогащены им

гранитные породы. Содержание в них фтора изменяется от 500 до 1400 мг/кг [Krauskopf, Bird, 1995], составляя в среднем 810 мг/кг [Wedepohl, 1969]. В карбонатных осадочных образованиях, песках и песчаниках его средняя концентрация равна 330 мг/кг, а в глинах и глинистых сланцах достигает 610 мг/кг [Григорьев, 2009]. В воде океанов содержание фтора около 1.3 мг/л [Химия..., 1979; Гордеев, 1983; Turekian, 1972]. В пресных и слабосолоноватых природных водах диапазон изменения содержания F весьма широк – от следовых значений в реках до 16 мг/л и более в подземных водоносных комплексах [Гордеев, 1981; Крайнов, Швеи, 1987; Шварцев и др., 2007; Аничкина, 2016]. Превышение нормативов этого элемента в подземных водах часто отмечается в регионах с тропическим климатом [Шварцев и др., 2007; Brindha, Elango, 2011; Malago et al., 2017; Subba Rao, 2017]. К основным процессам, способствующим формированию фтороносных вод, относят испарительное концентрирование, ионный обмен и техногенное загрязнение подземных вод стоками различных предприятий (химической, резино- и электротехнической промышленности, цветной и черной металлургии, машиностроения, в также теплоэлектростанций, использующих уголь) [Крайнов, Швеи, 1987; Шварцев и др., 2007; Янин, 2007].

Для территорий, охваченных многолетним промерзанием, данные о содержании фтора в пресных подземных водах в литературе единичны и относятся главным образом к зоне свободного водообмена. Известно, что на севере Западно-Сибирского артезианского бассейна в подземных водах содержание фтора находится в пределах санитарных норм [Бешенцев, 2013]. В родниковых водах Читинской области, где многолетнемерзлые породы (ММП) имеют островное распространение, преобладающая концентрация фтора 0.2–0.6 мг/л [Замана и др., 2011]. В арктических и субарктических регионах России, Аляски и Канады в надмерзлотных грунтовых водах криолитозоны его среднее содержание 0.1–0.3 мг/л [Шварцев, 1978], а в горных районах во фтороносных провинциях оно достигает 0.7 мг/л [Крайнов, Швеи, 1987]. На территории Восточной Сибири в пределах Алданского нагорья в зоне прерывистого распространения ММП в пресных подземных водах количество этого элемента изменяется от следовых значений до 0.4 мг/л [Филимонова, 1977]. Лишь в отдельных водных пробах, отобранных из разведочных скважин, заложенных в долинах рек в зонах крупных тектонических разломов, отмечается повышенное содержание фтора (до 2.7 мг/л).

В подмерзлотных водах, приуроченных к зоне затрудненного водообмена, анализ концентрации F был ранее проведен Н.П. Анисимовой и Т.М. Головановой для территории Центральной Якутии [Анисимова, 1958, 1981; Анисимова, Голованова,

1972]. В работах этих авторов отмечено, что в подземных водах одного и того же водоносного комплекса количество фтора может отличаться на порядок. Вместе с тем установлено, что концентрация этого элемента в подмерзлотных водах возрастает при увеличении их щелочности и содержания гидрокарбонатов натрия в растворе.

К настоящему времени накоплен большой объем информации о содержании фтора в подземных водах Центральной Якутии, требующий обобщения и анализа. Цель данной работы – оценить вероятность обнаружения повышенной концентрации фтора в подмерзлотных водоносных горизонтах этого региона.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Материалом для исследований послужили результаты гидрохимических работ, выполненных в Центральной Якутии сотрудниками Института мерзлотоведения (ИМЗ) СО РАН с 1984 по 2019 г., а также фонды различных геологических организаций. Для характеристики химического состава подмерзлотных водоносных горизонтов и изучения содержания в них фтора обобщены результаты анализов 296 водных проб. Наибольший массив данных имеется для подземных вод на территории г. Якутска и его окрестностей (153 пробы). В настоящее время здесь действуют около 50 глубоких водозаборных скважин, обеспечивающих техническое водоснабжение различных предприятий. На отдельных водозаборах установлены системы водоподготовки, в том числе для дефторирования подмерзлотной воды и ее использования в питьевых целях. В меньшей степени изучены пресные и слабосолоноватые (с минерализацией менее 3 г/л) подмерзлотные воды на Лено-Алданском (134 пробы) и Лено-Вилуйском (9 проб) междуречьях. Для оценки содержания F в поверхностных водах привлечены химические анализы водных проб из рек и озер (183 пробы).

При обработке результатов химических анализов использованы водные пробы, минерализация которых не превышала 3 г/л. Определение в них суммарной концентрации фторидов проведено потенциометрическим методом, до 2000 г. была использована электродная система, состоящая из фторидного ионселективного электрода и вспомогательного хлорсеребряного электрода, в дальнейшем был применен ионселективный монокристаллический лантанфторидный мембранный электрод.

ПРИРОДНЫЕ УСЛОВИЯ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЯКУТИИ

Рассматриваемая территория находится в пределах Центрально-Якутской аккумулятивной равнины с абсолютными отметками 200–400 м в

среднем течении Лены и ее притоков – рек Алдан и Виллой. Основную долю в формировании их стока составляют талые снеговые и дождевые воды. На подземное питание этих рек приходится около 13–17 % [Джамалов и др., 2012]. Минерализация воды в реках летом обычно не превышает 0.05–0.4 г/л, ее химический состав гидрокарбонатный магниевый-кальциевый, реакция среды (рН) – нейтральная. Зимой при отсутствии атмосферного питания минерализация воды р. Лена увеличивается до 0.3–0.7 г/л, а ее состав становится хлоридно-гидрокарбонатным смешанным по катионам [Анисимова, Павлова, 2014]. В реках Виллой и Алдан в период зимней межени минерализация воды увеличивается на 0.1–0.2 г/л относительно летних величин без смены химического типа. Малые реки в зимний период, как правило, полностью замерзают. Среднее содержание фтора в водотоках в целом незначительно отличается от среднего значения для рек вне криолитозоны и не достигает оптимального уровня для питьевых вод.

На территории исследований широко распространены озера различного генезиса. Химический состав воды в пресных водоемах преимущественно гидрокарбонатный кальциево-магниевый или магниевый-кальциевый [Анисимова, 1981]. В слабосоленоватых (минерализация 1–3 г/л) водах озер среди анионов также преобладают гидрокарбонаты, а главными катионами становятся натрий и магний. Реакция водной среды изменяется от нейтральной до весьма щелочной, а содержание фтора – от 0.2 до 1.1 мг/л, достигая в непроточных термокарстовых и эрозионно-термокарстовых водоемах 1.7–2.3 мг/л.

В гидрогеологическом отношении территория расположена в пределах Якутского артезианского бассейна, чехол которого сложен терригенно-карбонатными отложениями палеозойского и мезозойского возраста. В целом отложения чехла залегают полого с наклоном к внутренней части бассейна. Мощность осадочной толщи достигает 1–4 км и сокращается до 538–890 м в районе Якутского сводового поднятия [Балобаев и др., 2003]. Регион относится к области сплошного распространения ММП. Их мощность в среднем составляет 300–450 м, максимальная достигает 885 м на Буотамо-Амгинском междуречье [Балобаев и др., 2003]. Значительное снижение мощности мерзлых пород вплоть до образования сквозных таликов отмечается лишь под основным руслом Лены, ее крупными притоками и под отдельными озерами.

Под региональным криогенным водоупором распространены подмерзлотные водоносные горизонты, режим которых определяется длиннопериодными изменениями климата. На современном этапе развития идет оттаивание многолетнемерзлых пород снизу [Балобаев, 1991]. Следствием

подъема их подошвы большинство исследователей объясняют дефицит напоров и низкую минерализацию подмерзлотных вод в центральной части Якутского артезианского бассейна [Кононова, 1973; Романовский, 1983; Шепелев и др., 1984; Балобаев и др., 2003]. Микроэлементный состав подмерзлотных вод консервативен. Фтор входит в число постоянно встречающихся элементов.

ПОДМЕРЗЛОТНЫЕ ВОДЫ И ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ В НИХ ФТОРА

В Центральной Якутии подмерзлотные воды содержатся в архейских образованиях кристаллического фундамента и водоносных комплексов осадочного чехла, сложенного карбонатными породами верхнего протерозоя (венда) и кембрия, а также терригенными юрскими и меловыми отложениями (рис. 1).

Архейские породы фундамента представлены биотитовыми гнейсами, гранитогнейсами и кристаллическими сланцами. Глубина их залегания изменяется от 560–589 м в центральной части Якутского сводового поднятия до 1022 м в районе Амгинского прогиба [Балобаев и др., 2003]. Породы обводнены слабо. Минерализация подземных вод фундамента 4.0–4.3 г/л, химический состав преимущественно сульфатный или сульфатно-гидрокарбонатный натриевый. О количестве в них фтора данных нет, за исключением единичной пробы из скважины, пробуренной на пойме р. Лена. Здесь в подземных водах архейских пород содержание фтора 2.2 мг/л. Вероятно, это значение не является характерным, поскольку скважина расположена вблизи подруслового сквозного талика р. Лена. Севернее в районе Якутского свода в совместно опробованных подземных водах архейского и нижнеюрского водоносного комплексов концентрация фтора 8.8–9.0 мг/л.

Вендские и нижнекембрийские породы представлены трещиноватыми доломитами и доломитизированными известняками в разной степени битуминозными. Они изучены в южной части Центральной Якутии до широты г. Якутска. Глубина их залегания изменяется от 285 до 520 м. Подземные воды этих водоносных комплексов имеют минерализацию 3.5–4.4 г/л, сульфатный или гидрокарбонатно-хлоридный натриевый, реже смешанный по катионам, состав, нейтральную и слабощелочную реакцию водной среды. Количество в них F варьирует от 1.7 до 4.4 мг/л.

Отложения среднего кембрия широко распространены в пределах северного крыла Алданской антеклизы, за исключением Якутского выступа фундамента, где на архейских образованиях залегают юрские отложения [Балобаев и др., 2003; Шепелев, Макогонова, 2010].

Среднекембрийский водоносный комплекс сложен известняками, мергелями и доломитами.

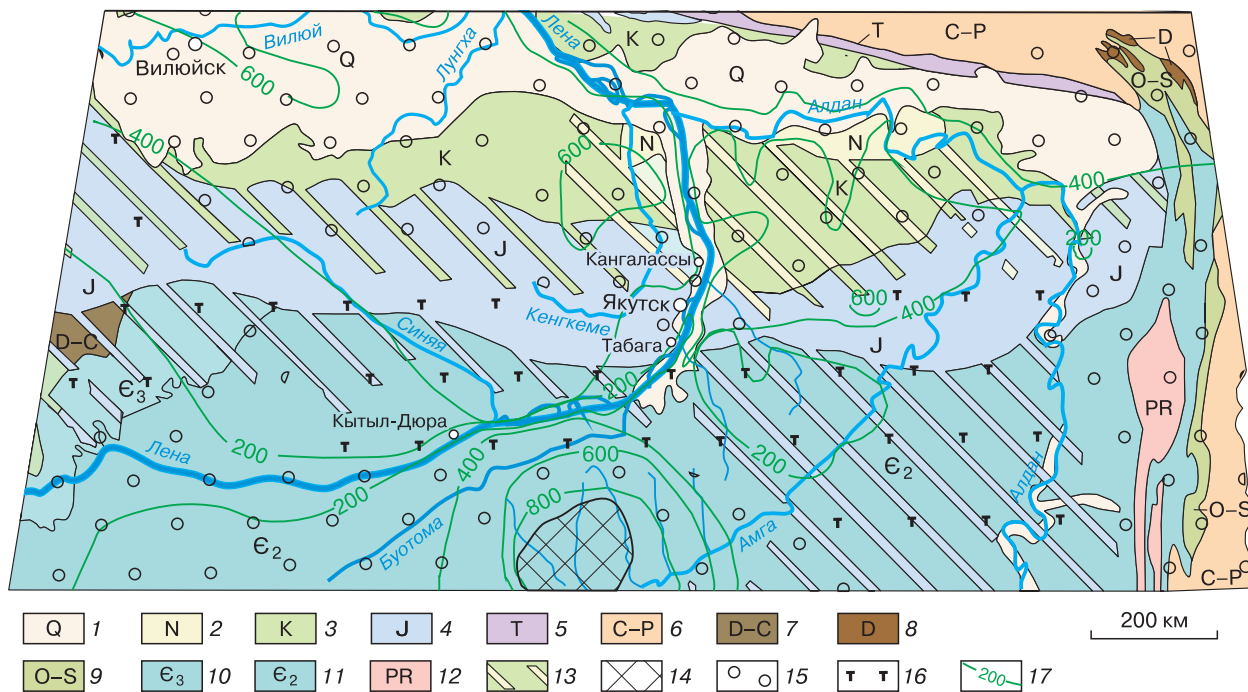


Рис. 1. Схематическая гидрогеологическая карта района исследований (схематизировано по: [Гидрогеология СССР, 1970; Карта..., 1983; Балобаев и др., 2003; Семенов, Железняк, 2018]).

1–12 – водоносные комплексы: 1 – четвертичных отложений, 2 – неогеновых отложений, 3 – меловых отложений, 4 – юрских отложений, 5 – триасовых отложений, 6 – каменноугольных и пермских отложений, 7 – девонских–каменноугольных отложений, 8 – девонских отложений, 9 – ордовикских и силурских отложений, 10 – верхнекембрийских отложений, 11 – нижнекембрийских отложений, 12 – верхнепротерозойских отложений; 13, 14 – комплексы, не содержащие гравитационной воды в жидкой фазе: 13 – замороженные водоносные комплексы (цвет узкой полосы соответствует возрасту замороженного комплекса, цвет фона – возрасту первого от поверхности водоносного комплекса), 14 – отсутствие подмерзлотных вод в чехле бассейна; 15, 16 – минерализация подземных вод: 15 – до 1 г/л, 16 – 1–3 г/л; 17 – изолинии мощности криогенного водоупора.

Он был вскрыт скважинами на глубине от 180 до 422 м. Минерализация подземных вод комплекса колеблется в пределах 0.9–1.9 г/л. В гидрокарбонатных и хлоридно-гидрокарбонатных натриевых водах, по величине pH нейтральных и слабощелочных, концентрация фтора изменяется от 3.4 до 8.8 мг/л (рис. 2, 3). Реже в среднекембрийских отложениях содержатся гидрокарбонатно-сульфатные воды, смешанные по катионному составу, нейтральные с содержанием фтора 1.3–2.2 мг/л.

Водоносные комплексы, приуроченные к терригенным породам юры и мела, наиболее изучены на территории г. Якутска [Балобаев и др., 2003; Шепелев, Макогонова, 2010; Павлова, Федорова, 2020]. Отдельные сведения о них получены на Лено-Амгинском и Лено-Вилуйском междуречьях. В основании разреза нижней юры залегают базальные конгломераты, перекрытые кварцевыми и полевошпатокварцевыми песчаниками с кремнистым и железистым цементом. Выше по разрезу распространены морские отложения – песчаники, переслаивающиеся с алевролитами и редкими линзами известняков и ракушечников. Глубина

залегания кровли нижнеюрского водоносного комплекса на Лено-Амгинском междуречье достигает 563 м, а в районе г. Якутска уменьшается до 173–420 м. На большей части территории города подмерзлотные воды этого водоносного комплекса гидравлически связаны со среднекембрийским комплексом, и вместе они представляют собой единую напорную систему порово-пластовых и пластово-трещинных вод [Балобаев и др., 2003].

Обводненные среднеюрские образования изучены в северной части г. Якутска. Породы, слагающие этот водоносный комплекс, – пески, переслаивающиеся с алевролитами, алевролитами и кварцевыми мелкозернистыми песчаниками, в разрезе часто встречаются глины и глинистые сланцы. Кровля водоносных отложений вскрыта скважинами на глубине от 380 до 500 м [Шепелев, Макогонова, 2010]. Верхнеюрский водоносный комплекс распространен севернее широты Кангаласского мыса. Он представлен континентальными образованиями (песками и песчаниками с прослоями и линзами углей) и залегает на глубине 200–540 м. В Лунгинской и Нижнеалданской

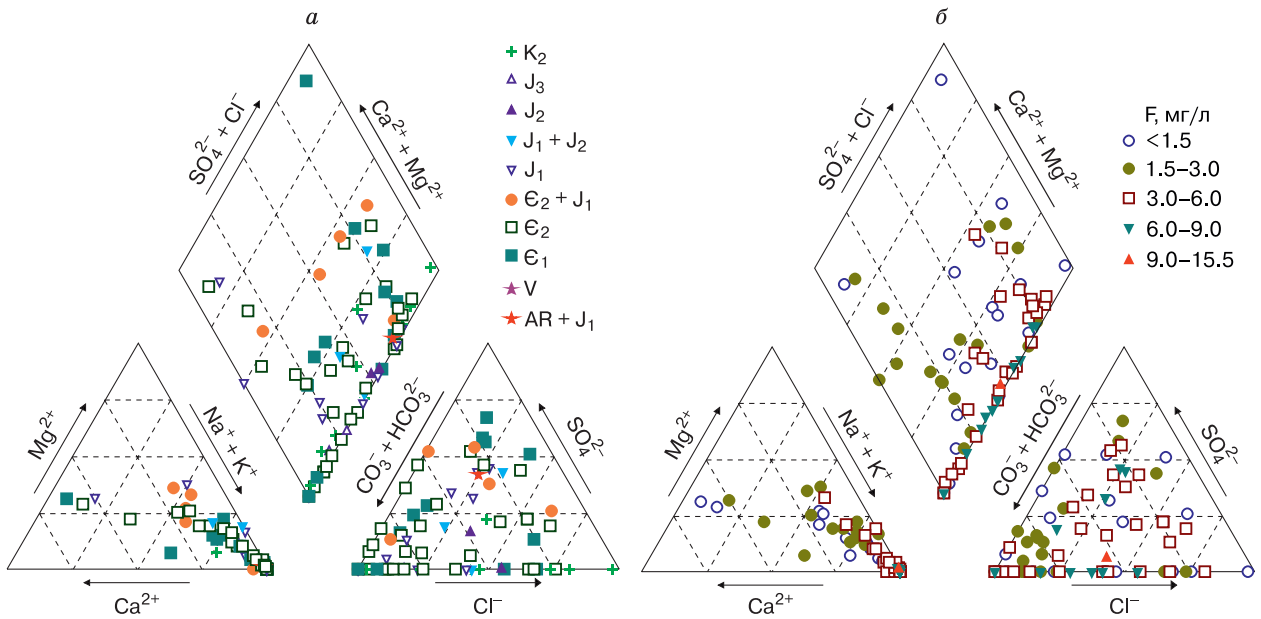


Рис. 2. Пайпер-диаграмма макрокомпонентного состава подземных вод различных водоносных комплексов (а) и содержание в них фтора (б) на Лено-Алданском междуречье.

Индекс возраста вмещающих пород: K_2 – нижнемеловой водоносный комплекс, J_3 – верхнеюрский водоносный комплекс, J_2 – среднеюрский водоносный комплекс, $J_1 + J_2$ – совместно опробованные средне- и нижнеюрский водоносные комплексы, J_1 – нижнеюрский водоносный комплекс, $E_2 + J_1$ – совместно опробованные нижнеюрский и среднекембрийский водоносные комплексы, E_2 – среднекембрийский водоносный комплекс, E_1 – нижнекембрийский водоносный комплекс, V – вендский водоносный комплекс, $AR + J_1$ – совместно опробованные нижнеюрский и архейский водоносные комплексы.

впадинах его кровля опускается до глубины 1800–2496 м, а первым от поверхности подмерзлотным водоносным комплексом становится нижнемело-

вой, сложенный переслаивающимися песками, песчаниками, аргиллитами и глинами. Обводненные нижнемеловые отложения в Нижнеалданской

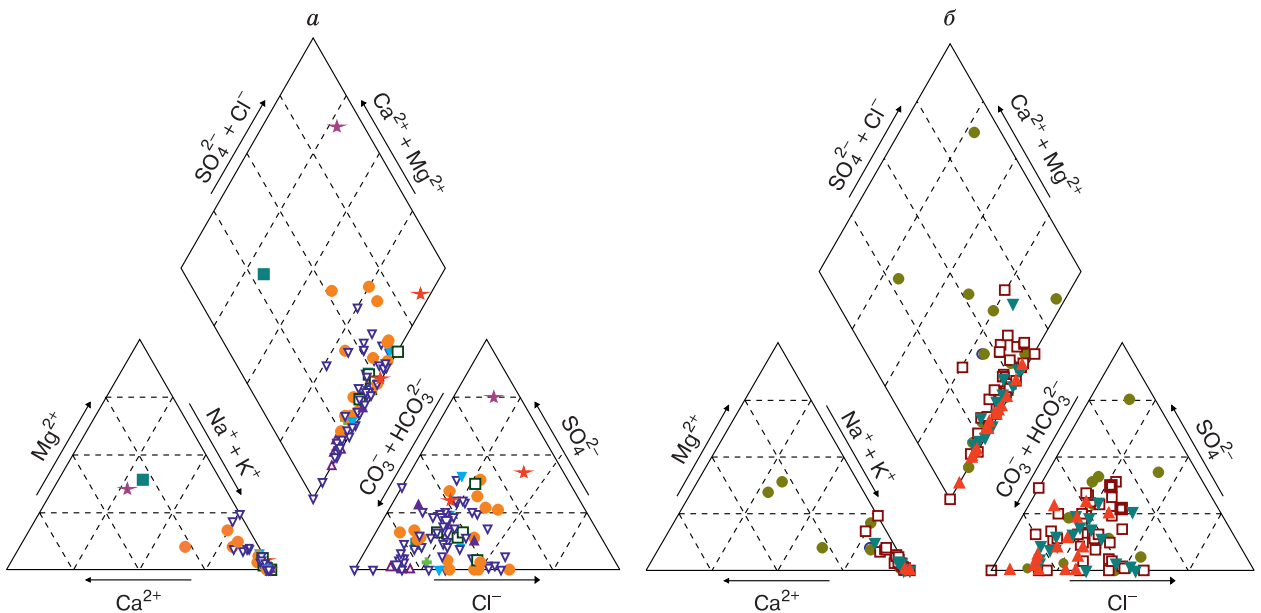


Рис. 3. Пайпер-диаграмма макрокомпонентного состава подземных вод различных водоносных комплексов (а) и содержание в них фтора (б) на Лено-Виллойском междуречье.

Условные обозн. см. рис. 2.

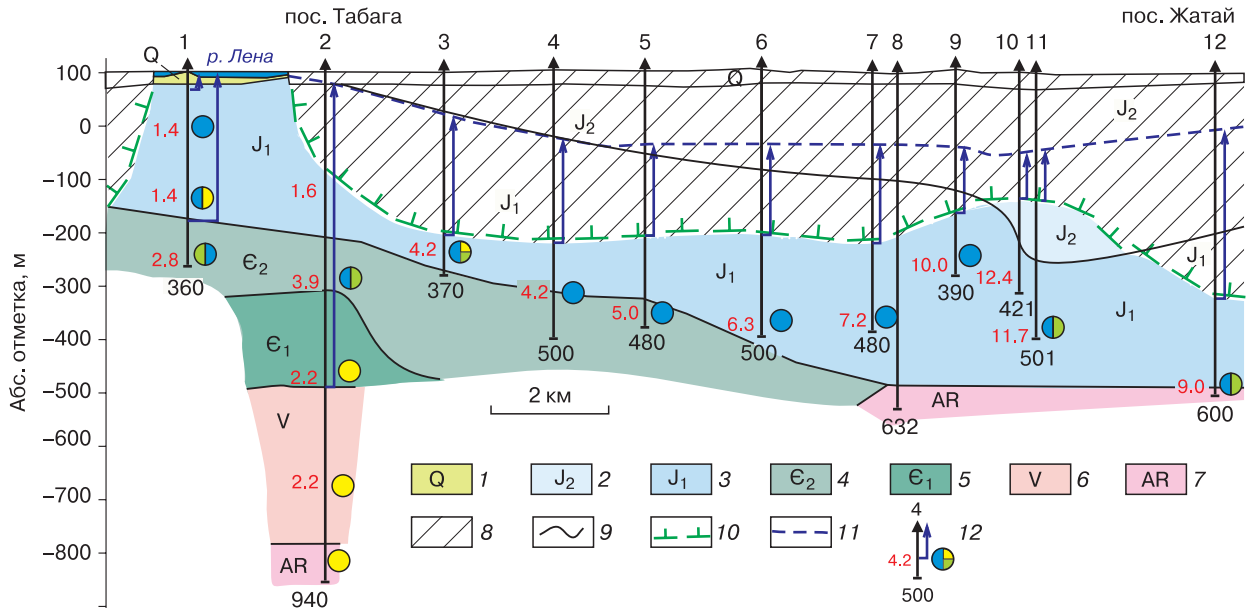


Рис. 4. Гидрогеологический разрез по линии пос. Табага–пос. Жатай (составлено по фондовым материалам ИМЗ СО РАН).

1 – четвертичный аллювиальный водоносный горизонт; 2 – среднеюрский терригенный водоносный комплекс; 3 – нижнеюрский терригенный водоносный комплекс; 4 – среднекембрийский карбонатный водоносный комплекс; 5 – нижнекембрийский карбонатный водоносный комплекс; 6 – верхнепротерозойский терригенно-карбонатный водоносный комплекс; 7 – локально-водоносная зона трещиноватости архейского кристаллического фундамента; 8 – криогенный водоупор; 9 – граница разновозрастных отложений; 10 – граница многолетнемерзлых пород; 11 – пьезометрический уровень подмерзлотных вод; 12 – гидрогеологическая скважина: цифра вверху – ее номер, внизу – глубина (м), слева – содержание фтора в воде (мг/л). Цвет соответствует анионному составу воды: синий – гидрокарбонатный, желтый – сульфатный, зеленый – хлоридный. Стрелка соответствует напору подземных вод.

впадине залегают под многолетнемерзлой толщей пород мощностью от 270 до 415–610 м.

В подмерзлотных водах, приуроченных к отложениям нижней и средней юры, количество F в целом изменяется от 4.1 до 11.7 мг/л. Локальное повышение его концентрации (9.0–15.5 мг/л) наблюдается в районе выступа кристаллического фундамента Якутского сводового поднятия (рис. 4). Этот выступ четко прослеживается по разрезам опорных скважин на левобережье р. Лена в северной части г. Якутска (оз. Белое, поселки Жатай и Марха), а на правобережье – в Техтюрской скважине (в приустьевой части р. Суола). Здесь на породах архея (глубина 560–600 м) залегают мезозойские отложения, а водоносные комплексы кембрия отсутствуют. Минерализация подземных вод юрских отложений 0.9–1.5 г/л, химический состав преимущественно гидрокарбонатно-натриевый (см. рис. 2, 3). Воды отличаются повышенной щелочностью (слабо- и умеренно-щелочные). Доля в них кальция, который мог бы образовывать со фтором вторичные минералы, редко достигает 2 % (мг-экв/л).

Подмерзлотные воды слаболитифицированных меловых и верхнеюрских пород имеют минерализацию 0.5–1.2 г/л, хлоридно-гидрокарбонат-

ный или гидрокарбонатный натриевый состав, содержание в них фтора 1.6–4.0 мг/л.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В подмерзлотных водах Центральной Якутии концентрация фтора изменяется от десятых долей до 15 мг/л. Прямой зависимости его содержания от глубины залегания водоносных горизонтов и современной мощности перекрывающего криогенного водоупора не прослеживается. Однако исключать влияние многолетнего промерзания на накопление F нельзя по следующей причине. Известно, что в щелочных условиях при диапазоне минерализации воды от 0.7 до 1.7 г/л скорость растворения фторидных минералов возрастает [Saxena, Ahmed, 2001]. Основным фактором, определяющим повышенную щелочность и низкое содержание кальция в подмерзлотных водах Центральной Якутии, является криогенное преобразование их состава: выпадение в осадок малорастворимых карбонатов кальция при промерзании водоносных комплексов и десульфатизация воды в условиях анаэробной среды и обогащенности воды органикой [Кононова, 1973; Анисимова, 1981; Фотиев, 2009]. Процесс десульфатизации возможен в периоды как аградации, так и деградации

мерзлоты [Анисимова, 1981]. Источником F являются водовмещающие породы. В районе Якутского сводового поднятия, где терригенные песчаники нижнеюрского водоносного комплекса контактируют с богатыми фтором гранитными породами, содержание этого галогена в подмерзлотных водах существенно увеличивается в условиях затрудненного водообмена и смещения подошвы криогенного водоупора (рис. 5). По данным В.Т. Балобаева [1991], в районе г. Якутска за счет более низких величин теплового потока в мерзлой зоне по сравнению с талой подмерзлотной в современный период (около 10 тыс. лет назад) скорость перемещения подошвы мерзлой толщи вверх оценивается величиной 1.7 см/год. При деградации мерзлой толщи напорные щелочные воды мигрируют в оттаявшие слои горных пород и смешиваются с содержащимися в них слабоминерализованными водами [Кононова, 1973; Анисимова, 1981]. В результате взаимодействия опресняющегося раствора с фторсодержащими минералами сохраняется возможность перехода фтора из горных пород и концентрирования его в подмерзлотных водах.

Согласно [Шварцев, 2017], фтор непосредственно отражает время эволюции системы “вода–порода”: чем оно больше, тем содержание избыточного элемента выше. О более длительном времени взаимодействия подмерзлотных вод с вмещающими породами и значительно худшими условиями водообмена в центральной и северной частях рассматриваемой территории свидетельствует аномально низкое гидростатическое давление в подмерзлотных комплексах. Так, в районе Якутского сводового поднятия и Нижнеалданской впадины гипсометрические отметки пьезометрического уровня подземных вод близки к нулю или даже отрицательные. Такая гидродинамическая обстановка формируется в условиях деградации ММП при сплошном их распространении, когда появляющийся свободный объем за счет фазовых переходов не компенсируется притоком воды.

Для подмерзлотных вод, распространенных на правом берегу р. Лена южнее широты г. Якутска, характерно относительно низкое содержание фтора. Геолого-гидрогеологическое строение этой территории имеет следующие особенности: 1) в песчаных отложениях средневысотных надпойменных террас р. Лена широко распространены межмерзлотные водоносные горизонты с пресными подземными водами, обедненными фтором; 2) под крупными озерами имеются сквозные талики, которые служат гидрогеологическими окнами, связывающими поверхностные, межмерзлотные и подмерзлотные воды; 3) на участках, нарушенных тектоническими разломами, отмечается сокращение мощности криогенного водоупора до 60–

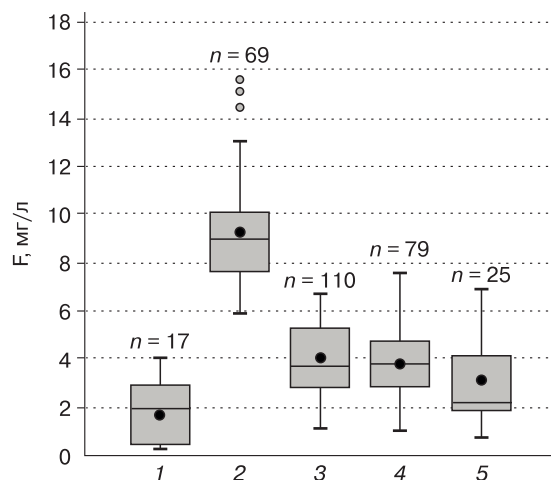


Рис. 5. Диаграмма изменения концентрации фтора F в подмерзлотных водах Центральной Якутии (n – количество точек опробования):

1 – мелового и верхнеюрского водоносных комплексов; 2, 3 – нижнеюрского водоносного комплекса: 2 – залегающего на породах кристаллического фундамента в районе Якутского свода, 3 – залегающего на отложениях кембрия; 4 – в совместно опробованных нижнеюрском и среднекембрийском водоносных комплексах; 5 – среднекембрийского водоносного комплекса.

100 м, а в толще карбонатных пород действуют как вертикальные, так и латеральные потоки по системам трещин и карстовых полостей; 4) до широты Табагинского мыса многие скважины, вскрывающие подмерзлотные водоносные комплексы, фонтанируют. Эти четыре фактора, определяющие возможность водообмена с поверхностью земли и атмосферой, приводят к формированию более разнообразного химического состава подмерзлотных вод и относительно низкого содержания в них фтора по сравнению с водоносными комплексами на левобережье Лены.

Минимальные концентрации фтора, независимо от литологического состава водовмещающих пород, отмечены в подземных водах, отобранных из скважин вблизи русла р. Лена. Например, в районе Табагинского и Кангаласского мысов в подмерзлотных водах содержание этого элемента составляет в среднем 2–3 мг/л, у пос. Сангары не превышает 1.6 мг/л, у поселков Кытыл-Дура и Октемцы понижается до 0.4–0.8 мг/л. Такое низкое количество F обусловлено наличием здесь сквозных таликовых зон, по которым, вероятно, происходит инфильтрационное питание подмерзлотных вод речными. Синхронность колебания уровней поверхностных вод Лены и подмерзлотных вод, вскрытых в пойме реки в районе пос. Табага, подтверждают это предположение [Шепелев и др., 2002].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Концентрация фтора в подмерзлотных водоносных комплексах Центральной Якутии практически повсеместно превышает нормативы для питьевых вод. На содержание этого элемента в подземных водах влияют гидродинамические и геокриологические процессы, протекающие вблизи подошвы криогенного водоупора. Под их влиянием формируется специфическая геохимическая среда, которая благоприятна для извлечения фтора из водовмещающих пород и аккумуляции его в растворе. Максимально обогащены этим элементом подземные воды гидрокарбонатно-натриевого состава с повышенной щелочностью. Колебания мощности многолетнемерзлой толщи в условиях затрудненного водообмена являются причиной неустойчивого равновесия подземных вод с вмещающими горными породами, что в итоге способствует накоплению в воде реакционно-активных химических элементов, к числу которых относится фтор.

Территориально подобные геологические условия сложились в районе Якутского выступа кристаллического фундамента, где на архейских образованиях залегают нижне- и среднеюрские терригенные водоносные горизонты. Здесь существует высокая вероятность обнаружить значительные концентрации фтора в подмерзлотных водах.

Оптимальные содержания F отмечаются лишь на участках, где водоносные горизонты имеют гидравлическую связь с р. Лена по сквозным таликам.

Выявленные особенности распределения фтора следует учитывать при постановке поисково-оценочных работ на подмерзлотные воды для исключения проблем с питьевым водоснабжением населения и планирования соответствующих водоподготовительных мероприятий.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-45-140065).

Литература

Анисимова Н.П. Фтор в питьевых водах Центральной Якутии // Тр. Сев.-Вост. отд-ния Ин-та мерзлотоведения. Якутск, 1958, вып. 1, с. 125–133.

Анисимова Н.П. Криогидрогеохимические особенности мерзлой зоны. Новосибирск, Наука, 1981, 153 с.

Анисимова Н.П. Гидрогеохимические исследования криолитозоны Центральной Якутии / Н.П. Анисимова, Н.А. Павлова. Новосибирск, Акад. изд-во "Гео", 2014, 189 с.

Анисимова Н.П., Голованова Т.В. Содержание фтора в подмерзлотных водах Центральной Якутии и методы снижения его концентрации // Геокриологические и гидрогеологические исследования Сибири. Якутск, Кн. изд-во, 1972, с. 158–163.

Аничкина Н.В. Исследования биогеохимии фтора в компонентах геосистем // Науч. обозрение. Биол. науки, 2016, № 3, с. 5–23.

Балобаев В.Т. Геотермия мерзлой зоны литосферы Севера Азии. Новосибирск, Наука, 1991, 193 с.

Балобаев В.Т. Подземные воды Центральной Якутии и перспективы их использования / В.Т. Балобаев, Л.Д. Иванова, Н.М. Никитина и др. Новосибирск, Изд-во СО РАН, 2003, 137 с.

Бешенцев В.А. Ресурсы подземных вод Ямало-Ненецкого нефтегазодобывающего региона и проблемы их использования // Изв. Урал. гос. горн. ун-та, 2013, № 2 (30), с. 15–20.

Вернадский В.И. Избранные сочинения. М., Изд-во АН СССР, 1955, т. 2, 615 с.

Гидрогеология СССР. Т. XX. Якутская АССР / Под ред. А.И. Ефимова, И.К. Зайцева. М., Недра, 1970, 384 с.

Гордеев В.В. Новая оценка поверхностного стока растворенных веществ в океан // Докл. АН СССР, 1981, т. 261, № 5, с. 1227–1230.

Гордеев В.В. Речной сток в океан и черты его геохимии. М., Наука, 1983, 160 с.

Григорьев Н.А. Распределение химических элементов в верхней части континентальной коры. Екатеринбург, Изд-во УрО РАН, 2009, 382 с.

Джамалов Р.Г., Кричевец Г.Н., Сафронова Т.И. Современные изменения водных ресурсов в бассейне р. Лены // Водн. ресурсы, 2012, т. 39, № 2, с. 147–160.

Донских И.В. Влияние фтора и его соединений на здоровье населения (обзор литературных данных) // Бюл. ВСНЦ РАМН, 2013, № 3 (91), ч. 1, с. 179–185.

Замана Л.В., Усманова Л.И., Усманов М.Т. Эколого-геохимическая оценка подземных вод в окрестностях г. Чита, используемых жителями города для децентрализованного водоснабжения // Вода: химия и экология, 2011, № 12 (42), с. 105–109.

Карта мерзлотно-гидрогеологического районирования Восточной Сибири м-ба 1:2 500 000 / Под ред. П.И. Мельникова. М., ГУГК, 1983, 4 л.

Кононова Р.С. Гидрохимическая зональность подземных вод как один из показателей палеомерзлотных условий // II Междунар. конф. по мерзлотоведению: Докл. и сообщ. Якутск, Кн. изд-во, 1973, вып. 5, с. 90–94.

Крайнов С.Р. Геохимия подземных вод хозяйственно-питьевого назначения / С.Р. Крайнов, В.М. Шведа. М., Недра, 1987, 237 с.

Павлова Н.А., Федорова С.В. Фтор в пресных и слабосоленых водах в области криолитозоны (Центральная Якутия) // Материалы IV Всерос. науч. конф. с междунар. участием "Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами". Улан-Удэ, Изд-во БНЦ СО РАН, 2020, с. 171–174.

Романовский Н.Н. Подземные воды криолитозоны. М., Изд-во Моск. ун-та, 1983, 231 с.

Семенов В.П., Железняк М.Н. Особенности геотемпературного поля и залегания многолетнемерзлой толщи Вилюйской синеклизы // Природ. ресурсы Арктики и Субарктики, 2018, т. 26, № 4, с. 45–54.

Филимонова Л.Г. Геохимия фтора в зоне гипергенеза областей многолетней мерзлоты. М., Наука, 1977, 152 с.

Фотиев С.М. Криогенный метаморфизм пород и подземных вод (условия и результаты). Новосибирск, Акад. изд-во "Гео", 2009, 279 с.

Химия океана. Т. 1. Химия вод океана / Под ред. О.К. Бордовского, В.Н. Иваненкова. М., Наука, 1979, 518 с.

Шварцев С.Л. Гидрогеохимия зоны гипергенеза. М., Недра, 1978, 287 с.

- Шварцев С.Л.** Геологическая эволюция и самоорганизация системы вода–порода. Т. 2. Система вода–порода в условиях гипергенеза / С.Л. Шварцев, Б.Н. Рыженко, В.А. Алексеев и др. Новосибирск, Изд-во СО РАН, 2007, 389 с.
- Шварцев С.Л.** Механизмы концентрирования фтора в азотных термах // Изв. Том. политехн. ун-та. Инжиниринг георесурсов, 2017, т. 328, № 12, с. 105–115.
- Шепелев В.В.** Мерзлотно-гидрогеологические условия Восточной Сибири / В.В. Шепелев, О.Н. Толстихин, В.М. Пигузова и др. Новосибирск, Наука, 1984, 191 с.
- Шепелев В.В.** Мониторинг подземных вод криолитозоны / В.В. Шепелев, А.Б. Бойцов, Н.Г. Оберман и др. Якутск, Изд-во Ин-та мерзлотоведения СО РАН, 2002, 172 с.
- Шепелев Н.Г., Макогонова О.В.** Моделирование гидрогеологических условий подмерзлотного водоносного комплекса для территории г. Якутска // Наука и образование, 2010, № 2 (58), с. 21–26.
- Янин Е.П.** Фтор в окружающей среде (распространенность, поведение, техногенное загрязнение) // Экол. экспертиза, 2007, № 4, с. 2–98.
- Brindha K., Elango L.** Fluoride in groundwater: causes, implications and mitigation measures // S.D. Monroy (Ed.). Fluoride Properties, Applications and Environmental Management. N.Y., Publisher Nova, 2011, p. 111–136.
- Fordyce F.M., Vrana K., Zhovinsky E. et al.** A health risk assessment for fluoride in Central Europe // Environ. Geochem. Health, 2007, No. 29, p. 83–102.
- Krauskopf K.B., Bird D.K.** Introduction to Geochemistry. N.Y., McGraw-Hill, 1995, 647 p.
- Malago J., Makoba E., Muzuka A.N.N.** Fluoride levels in surface and groundwater in Africa: A review // Amer. J. Water Sci. and Eng., 2017, vol. 3, No. 1, p. 1–17.
- Ozsvath D.L.** Fluoride and environmental health: a review // Rev. Environ. Sci. Biotechnol., 2009, No. 8, p. 59–79.
- Saxena V., Ahmed S.** Dissolution of fluoride in groundwater: a water-rock interaction study // Environ. Geol., 2001, vol. 40, p. 1084–1087.
- Subba Rao N.** Controlling factors of fluoride in groundwater in a part of South India // Arabian J. Geosci., 2017, vol. 10, No. 524.
- Turekian K.K.** Chemistry of the Earth. N.Y., Holf, Rinehart and Winston, Inc., 1972, 136 p.
- Wedepohl K.H.** Handbook of geochemistry. Berlin, Springer-Verlag, 1969, vol. II-1, 442 p.
- WHO** (World Health Organization). Guidelines for drinking-water quality: fourth edition incorporating the first addendum. Switzerland, Geneva, World Health Organization, 2017, 631 p.
- Yousefi M., Ghalehaskar S., Asghari F.B. et al.** Distribution of fluoride contamination in drinking water resources and health risk assessment using geographic information system, northwest Iran // Regulatory Toxicol. and Pharmacol., 2019, vol. 107, 104408.
- Anisimova N.P., Golovanova T.V. Fluorine content in permafrost waters of Central Yakutia and methods for reducing its concentration. In: Geocryological and hydrogeological studies of Siberia. Yakutsk, Kn. izd-vo, 1972, p. 158–163 (in Russian).
- Anichkina N.V. Research of fluorine biogeochemistry in the ecosystem components. Nauchnoye obozreniye. Biologicheskoye nauki [Scientific Review. Biological Science], 2016, No. 3, p. 5–23 (in Russian).
- Balobaev V.T. Geotermiya merzloy zony litosfery Severa Azii [Geothermy of the permafrost zone of the lithosphere in North Asia]. Novosibirsk, Nauka, 1991, 193 p. (in Russian).
- Balobaev V.T., Ivanova L.D., Nikitina N.M. et al. Podzemnyye vody Tsentral'noy Yakutii i perspektivy ikh ispol'zovaniya [Groundwaters in Central Yakutia and prospects of their use]. Novosibirsk, Publishing House of SB RAS, 2003, 137 p. (in Russian).
- Beshentsev V.A. The groundwater resources of the Yamal-Nenets oil and gas producing region and problems of their use. Izvestiya Ural'skogo gosudarstvennogo gornogo universiteta [News of the Ural State Mining University], 2013, No. 2 (30), p. 15–20 (in Russian).
- Vernadsky V.I. Izbrannyye sochineniya [Selected works]. Moscow, Publishing House of the Academy of Sciences of the USSR, 1955, vol. 2, 615 p. (in Russian).
- Gidrogeologiya SSSR [Hydrogeology of the USSR]. Vol. XX. Yakut ASSR / A.I. Efimova, I.K. Zaitsev (Eds.). Moscow, Nedra, 1970, 384 p. (in Russian).
- Gordeev V.V. A new estimate of the surface runoff of dissolved substances into the ocean. Doklady AN SSSR [Reports of the USSR Academy of Sciences], 1981, vol. 261, No. 5, p. 1227–1230 (in Russian).
- Gordeev V.V. Rechnoy stok v okean i cherty yego geokhimii [River runoff into the ocean and features of its geochemistry]. Moscow, Nauka, 1983, 160 p. (in Russian).
- Grigoriev N.A. Raspredeleniye khimicheskikh elementov v verkhney chasti kontinental'noy kory [Chemical elements distribution in the upper part continental crust]. Ekaterinburg, UB RAS, 2009, 382 p. (in Russian).
- Dzhamalov R.G., Krichevets G.N., Safronova T.I. Current changes in water resources in Lena river basin. Vodnye resursy [Water Resources], 2012, vol. 39, No. 2, p. 147–160.
- Donskikh I.V. The influence of fluorine and its compounds on people's health (literature review). Byulleten' VSNTS RAMN [Bulletin of the Eastern Siberian Scientific Center of the SB of the RAMS], 2013, vol. 1, No. 3 (91), p. 179–185 (in Russian).
- Zamana L.V., Usmanova L.I., Usmanov M.T. Ecologic-geochemical assessment of ground waters in Chita city used for decentralized water-supply. Voda: khimiya i ekologiya [Water: Chemistry and Ecology], 2011, No. 12 (42), p. 105–109 (in Russian).
- Karta merzlotno-gidrogeologicheskogo rayonirovaniya Vostochnoy Sibiri masshtaba 1:2 500 000 [Map of permafrost-hydrogeological zoning of Eastern Siberia on a scale of 1: 2 500 000]. P.I. Melnikov, O.N. Tolstikhin (Eds.). Moscow, GUGK, 1983, 4 sheet (in Russian).
- Kononova R.S. Hydrochemical zoning of groundwater as one of the indicators of paleo-permafrost conditions. In: II International Conference on Permafrost. Reports and communications. Yakutsk, Kn. izd-vo, 1973, vol. 5, p. 90–94 (in Russian).
- Kraynov S.R., Shvets V.M. Geokhimiya podzemnykh vod khozyaystvenno-pit'yevogo naznacheniya [Geochemistry of ground waters for household and drinking purposes]. Moscow, Nedra, 1987, 237 p. (in Russian).

References

- Anisimova N.P. Fluorine in drinking waters of Central Yakutia. In: Proc. of the North-Eastern Branch of the Permafrost Institute. Yakutsk, 1958, No. 1, p. 125–133 (in Russian).
- Anisimova N.P. Kriogidrogeokhimicheskiye osobennosti merzloy zony [Cryohydrogeochemical features of the frozen zone]. Novosibirsk, Nauka, 1981, 153 p. (in Russian).
- Anisimova N.P., Pavlova N.A. Gidrogeokhimicheskiye issledovaniya kriolitozony Tsentral'noy Yakutii [Hydrogeochemical studies of permafrost in Central Yakutia]. Novosibirsk, Academic Publishing House "Geo", 2014, 189 p. (in Russian).

- Pavlova N.A., Fedorova S.V. Fluoride levels in fresh and slightly saline waters of permafrost zone (Central Yakutia). In: Proc. of the Fourth all-Russian Scientific Conference with International Participation "Water-rock interaction: geological evolution". Ulan-Ude, BSC SB RAS Publisher, 2020, p. 171–174 (in Russian). DOI: 10.31554/978-5-7925-0584-1-2020-171-174.
- Romanovskii N.N. Podzemnyye vody kriolitozony [Ground waters of the cryolithozone]. Moscow, Publishing House of Moscow State University, 1983, 231 p. (in Russian).
- Semenov V.P., Zheleznyak M.N. Features of geothermal field and occurrence of permafrost section of Vilyui syncline. Prirodnyye resursy Arktiki i Subarktiki [Arctic and Subarctic Natural Resources], 2018, vol. 26, No. 4, p. 45–54 (in Russian). DOI: 10.31242/2618-9712-2018-26-4-45-54.
- Filimonova L.G. Geokhimiya ftora v zone gipergeneza oblastey mnogoletney merzloty [Fluorine geochemistry in the hypergenesis zone of permafrost]. Moscow, Nauka, 1977, 152 p. (in Russian).
- Fotiev S.M. Kriogennyi metamorfizm porod i podzemnykh vod (usloviya i rezul'taty) [Cryogenic metamorphism of rocks and groundwater (conditions and results)]. Novosibirsk, Academic Publishing House "Geo", 2009, 279 p. (in Russian).
- Khimiya okeana. T. 1. Khimiya vod okeana [Ocean chemistry. Vol. 1. Chemistry of ocean waters]. O.K. Bordovsky, V.N. Ivanenkov (Eds.). Moscow, Nauka, 1979, 518 p. (in Russian).
- Shvartsev S.L. Gidrogeokhimiya zony gipergeneza [Hydrogeochemistry of the hypergenesis zone]. Moscow, Nedra, 1978, 287 p. (in Russian).
- Shvartsev S.L., Ryzhenko B.N., Alekseyev V.A. et al. Geologicheskaya evolyutsiya i samoorganizatsiya sistemy voda–poroda. T. 2. Sistema voda–poroda v usloviyakh gipergeneza [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, 389 p. (in Russian).
- Shvartsev S.L. Mechanisms of fluorine accumulation in nitric thermal waters. Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering], 2017, vol. 328, No. 12, p. 105–115 (in Russian).
- Shepelev V.V., Tolstikhin O.N., Piguzova V.M. et al. Merzlotno-gidrogeologicheskiye usloviya Vostochnoy Sibiri [Permafrost-hydrogeological conditions of Eastern Siberia]. Novosibirsk, Nauka, 1984, 191 p. (in Russian).
- Shepelev V.V., Boytsov A.B., Oberman N.G. et al. Monitoring podzemnykh vod kriolitozony [Monitoring of ground waters of the permafrost zone]. Yakutsk, Publishing House of the Permafrost Institute SB RAS, 2002, 172 p. (in Russian).
- Shepelev N.G., Makogonova O.V. Modeling of hydrogeological conditions of subpermafrost aquifer for the territory of Yakutsk. Nauka i obrazovaniye [Science and Education], 2010, No. 2 (58), p. 21–26 (in Russian).
- Yanin E.P. Fluorine in the environment (prevalence, behavior, technogenic pollution). Ekologicheskaya ekspertiza [Environmental Expertise], 2007, No. 4, p. 2–98 (in Russian).
- Brindha K., Elango L. Fluoride in groundwater: causes, implications and mitigation measures. In: S.D. Monroy (Ed.). Fluoride Properties, Applications and Environmental Management. New York, Publisher Nova, 2011, p. 111–136.
- Fordyce F.M., Vrana K., Zhovinsky E. et al. A health risk assessment for fluoride in Central Europe. Environ Geochem Health, 2007, No. 29, p. 83–102. – <https://doi.org/10.1007/s10653-006-9076-7>
- Krauskopf K.B., Bird D.K. Introduction to Geochemistry. New York, McGraw-Hill, 1995, 647 p.
- Malago J., Makoba E., Muzuka A.N.N. Fluoride levels in surface and groundwater in Africa: A review. American J. Water Science and Engineering, 2017, vol. 3, No. 1, p. 1–17, DOI: 10.11648/j.ajwse.20170301.11.
- Ozsvath D.L. Fluoride and environmental health: a review. Rev. Environ. Sci. Biotechnol., 2009, No. 8, p. 59–79. – <https://doi.org/10.1007/s11157-008-9136-9>
- Saxena V., Ahmed S. Dissolution of fluoride in groundwater: a water-rock interaction study. Environmental Geology, 2001, vol. 40, p. 1084–1087. – <https://doi.org/10.1007/s002540100290>
- Subba Rao N. Controlling factors of fluoride in groundwater in a part of South India. Arabian J. Geosciences, 2017, vol. 10, No. 524. – <https://doi.org/10.1007/s12517-017-3291-7>
- Turekian K.K. Chemistry of the Earth. New York, USA, Holf, Rinehart and Winston, Inc., 1972, 136 p.
- Wedepohl K.H. Handbook of geochemistry. Berlin, Springer-Verlag, 1969, vol. II-1, 442 p.
- WHO (World Health Organization). Guidelines for drinking-water quality: fourth edition incorporating the first addendum. Switzerland, Geneva, World Health Organization, 2017, 631 p.
- Yousefi M., Ghalehaskar S., Asghari F.B. et al. Distribution of fluoride contamination in drinking water resources and health risk assessment using geographic information system, northwest Iran. Regulatory Toxicology and Pharmacology, 2019, vol. 107, 104408, DOI: 10.1016/j.yrtph.2019.104408.

*Поступила в редакцию 30 апреля 2021 г.,
после доработки – 31 января 2022 г.,
принята к публикации 6 февраля 2022 г.*