

Фтор в поверхностных и надмерзлотных водах Центральной Якутии

С.В. Федорова, Н.А. Павлова*

Институт мерзлотоведения им П.И. Мельникова СО РАН, Якутск, Россия

*narpavlova@mpi.ysn.ru

Аннотация. На основе обобщения результатов гидрохимических работ, выполненных сотрудниками ИМЗ СО РАН с 1984 по 2019 г., выяснено распределение фтора в пресных и слабосолоноватых поверхностных и надмерзлотных водах Центральной Якутии. Оптимальная концентрация фтора в питьевых водах, согласно санитарным требованиям, составляет 0,5–1,0 мг/л при предельно-допустимой 1,2–1,5 мг/л. Избыточное потребление фтора приводит к нарушениям в костно-мышечной, нейроэндокринной и сердечно-сосудистой системах, а недостаток – к формированию кариеса зубов. Для проведения исследований использованы химические анализы водных проб из поверхностных водотоков и водоемов (479 проб), а также из подземных вод зоны свободного водообмена (375 проб). Установлено, что в водах рек и в подземных водах подрусловых таликов среднее содержание фтора составляет не более 0,3 мг/л и не достигает оптимального уровня для питьевых вод. В водах озер и в таликах под водно-эрозионными и тукулановыми озерами также отмечается дефицит фтора. Однако, в непроточных озерах, в катионном составе воды которых более 50 % приходится на натрий-ион, содержание фтора может превышать 1,5 мг/л, а в водах таликов под непроточными термокарстовыми озерами его концентрация и вовсе достигает 3,2 мг/л. Насыщение надмерзлотных вод фтором может происходить на участках их разгрузки под влиянием процессов криогенной дезинтеграции водовмещающих пород и метаморфизации химического состава воды при фазовых переходах, которые приводят к выпадению из раствора кальцита, повышению его pH и накоплению фтора.

Ключевые слова: фтор, река Лена, малые реки, озера, талики, надмерзлотные воды, химический состав

Благодарности. Работа частично выполнена при поддержке РФФИ, грант № 20-05-00670. Авторы выражают искреннюю благодарность Бойцовой Л.Ю. и Шепелевой О.В. (ИМЗ СО РАН), выполнявшим аналитические исследования водных проб, Шепелеву В.В. (ИМЗ СО РАН) за ряд полезных замечаний.

Введение

Одним из химических элементов, количество которых регламентируется в питьевых водах, является фтор. Его предельно-допустимая концентрация в зависимости от климатической зоны составляет от 1,2 до 1,5 мг/л, а рекомендуемое содержание определено в количестве 0,5–1,0 мг/л [1–5]. Высокие концентрации потребления фтора оказывают токсическое воздействие на костно-мышечную, нейроэндокринную и сердечно-сосудистую системы, низкие – приводят к формированию кариеса зубов [1–4, 6–8].

При изучении фторсодержащих вод в разных регионах мира большинство исследователей связывают высокие концентрации этого элемента с растворением флюорита и его десорбцией из водовмещающих пород в условиях щелочной сре-

ды и низкой концентрации кальция [9–12]. Кроме этого, среди факторов, способствующих накоплению фтора в подземных водах, называют испарительное концентрирование, ионный обмен, антропогенное загрязнение подземных вод.

Фтор относительно широко распространен в природе. Среднее его содержание в литосфере составляет 400–800 мг/кг [13, 14]. Наиболее обогащены им гранитные породы, в которых концентрация фтора изменяется от 500 до 1400 мг/кг, составляя в среднем 810 мг/кг [15, 16]. В карбонатных осадочных образованиях, песках и песчаниках его среднее содержание 330 мг/кг [17]. Концентрация фтора в воде океанов составляет около 1,3 мг/л [18–20]. В пресных и слабосолоноватых природных водах его содержание изменяется от следовых значений в реках до 16 мг/л и

более в подземных водоносных комплексах [9, 10, 21, 22]. Превышенные концентрации фтора в подземных водах чаще всего отмечаются в регионах с тропическим климатом [9, 23–25].

Для территории криолитозоны сведения о содержании фтора в пресных подземных водах единичны. Известно, что в надмерзлотных грунтовых водах криолитозоны России среднее содержание фтора в среднем составляет 0,1–0,3 мг/л, а на территории Аляски и Канады – 0,08–0,1 мг/л [10, 26]. В области островного и прерывистого распространения многолетнемерзлых пород в надмерзлотных водах количество фтора в Восточной Сибири на Алданском плато не превышает 0,4 мг/л, а в Западном Забайкалье изменяется от 0,1 до 0,6 мг/л [27–29]. На территории сплошной криолитозоны распределение фтора изучалось, в основном, в подмерзлотных водах Центральной Якутии [30–35]. Установлено, что в подмерзлотных водоносных горизонтах этого региона содержание фтора может в 1,5–10 раз превышать нормативы для питьевых вод. В связи со столь значительным его содержанием подмерзлотные воды могут использоваться для питьевых целей только после предварительной водоподготовки.

Цель данной работы – изучение распределения фтора в поверхностных водах и подземных водах зоны свободного водообмена на территории Центральной Якутии. Этот обширный регион Якутии наиболее населен. Несмотря на наличие многочисленных озер и крупных рек (Лена, Вилуй, Алдан и их притоки), вопросы питьевого водообеспечения здесь стоят весьма остро. Основными причинами этому служат: 1) отдаленность гарантированного поверхностного источника водоснабжения от населенных пунктов; 2) ограниченность ресурсов пресных подземных вод из-за наличия мощной толщи многолетнемерзлых пород, выступающей в роли регионального криогенного водоупора; 3) несоответствие отдельных показателей качества подземных вод действующим нормативам, в том числе по повышенному содержанию в них фтора.

Материалы и методы исследований

Материалом для написания данной работы послужили результаты гидрохимических анализов, выполненные в Центральной Якутии сотрудниками ИМЗ СО РАН с 1984 по 2019 г., а также фонды различных геологических организаций. При обработке данных использовались

результаты химических анализов водных проб из рек (183 пробы) и озер (296 проб). В выборку включены пробы воды, отобранные из скважин, вскрывших подрусловые талики (75 проб), подозерные талики термокарстовых и эрозийно-термокарстовых котловин (81 проба), подозерные талики, приуроченные к водно-эрозийным и тукулановым озерам (33 пробы). Также привлечены данные определения фтора в надмерзлотных водах сезонно-талого слоя (86 проб), надмерзлотных грунтовых и межмерзлотных водах субэдральных таликов (100 проб).

При обработке результатов химических анализов использовались пробы воды, минерализация которых не превышала 3 г/л. Определение в них суммарной концентрации фторидов проводилось потенциометрическим методом с использованием фторидного ионселективного электрода.

Природные условия территории и гидрохимическая характеристика поверхностных вод

Исследуемая территория расположена в пределах Якутского артезианского бассейна, 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 [35]. Горные породы проморожены, в среднем, до глубины 300–450 м [35]. Значительное снижение мощности мерзлых пород вплоть до образования сквозных таликов отмечается лишь под основным руслом р. Лена, ее крупными притоками и под отдельными крупными озерами. Распределение надмерзлотных таликов по площади неравномерное. Коэффициент таликовости, определяемый как отношение суммарной площади таликов к площади их распространения, изменяется от менее 0,5 до более 4 [35] (рис. 1). На гидродинамический и гидрохимический режим надмерзлотных грунтовых вод таликов оказывают влияние не только многолетние циклические изменения климата, но и краткосрочные колебания метеорологических параметров. В результате воздействия процессов многолетнего и сезонного промерзания-протаивания водовмещающих пород надмерзлотные грунтовые воды приобретают разнообразный химический состав с широким спектром микроэлементов.

Одной из особенностей региона является слабое развитие речной сети, густота которой изменяется от менее 0,1 до 0,3 км/км². Этому

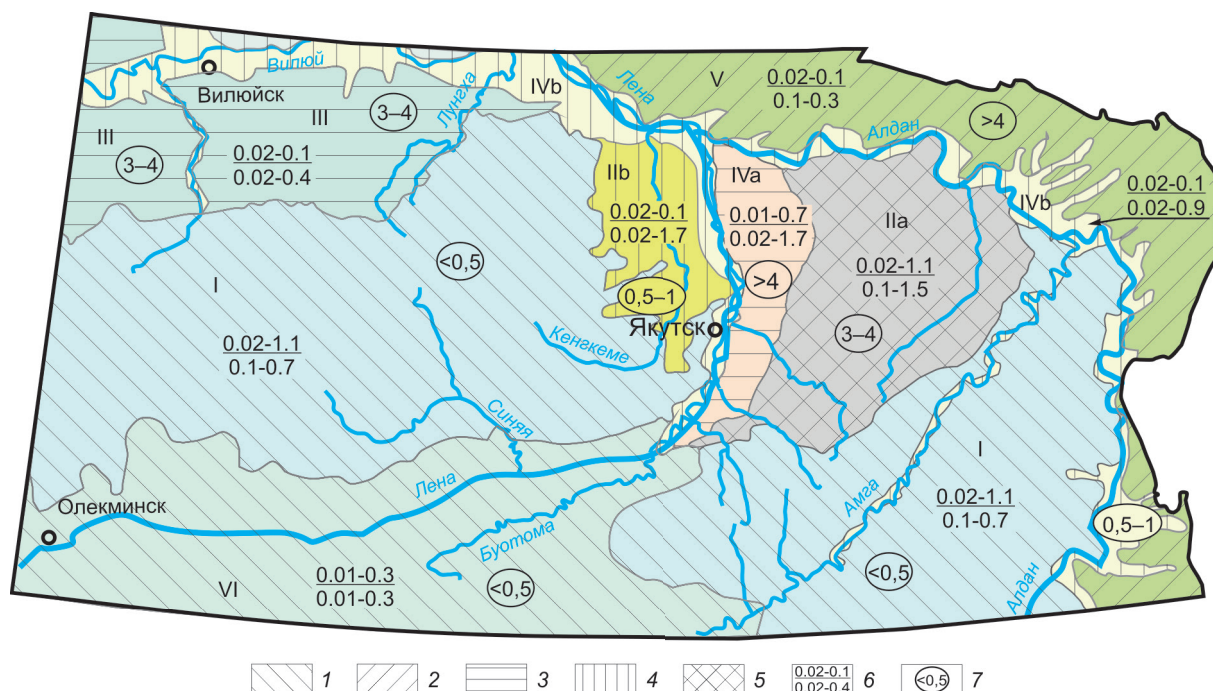


Рис. 1. Геоморфологическая схема района исследований.

Типы рельефа: I–V – равнины (I – денудационная; II – эрозионно-аккумулятивная: IIa – Абалахская, IIb – левобережье р. Лена; III – озерно-аллювиальная Лено-Вилуйская; IV – аллювиальная: IVa – средневысотные надпойменные террасы р. Лена (кердемская, бестяхская, тунгюлюнская), IVb – эрозионно-аккумулятивная на левобережье р. Лена, пойма и низкие надпойменные террасы рек Лена, Алдан, Вилуй и их притоков; V – предгорная ледниковая); VI – Приленское плато. 1–5 – преобладающий генезис озерных котловин: 1 – водно-эрозионный и эрозионно-термокарстовый, реже термокарстовый, 2 – термокарстовый и эрозионно-термокарстовый, 3 – водно-эрозионный и тукулановый, реже термокарстовый, 4 – водно-эрозионный, 5 – термокарстовый; 6 – коэффициент таликовости территории [35].

Fig. 1. Geomorphological scheme of the study area.

Relief types: I–V – plains: I – denudation plain; II – erosion-accumulative plain: IIa – Abalakhskaya plain, IIb – left bank of the Lena river; III – lacustrine-alluvial Lena-Vilyui plain; IV – alluvial plain: IVa – medium-height above-floodplain terraces of the Lena river (Kerdemskaya, Bestyakhskaya, Tyungyulyunskaya), IVb – erosion-accumulative plain on the left bank of the Lena river, floodplain and low above-floodplain terraces of the Lena, Aldan, Vilyui rivers and their tributaries; V – foothill glacial plain; VI – Prilenskoe plateau. 1–5 – predominant genesis of lake basins: 1 – water-erosion and erosion-thermokarst, less often thermokarst, 2 – thermokarst and erosion-thermokarst, 3 – water-erosion and tukulan, less often thermokarst, 4 – water-erosion, 5 – water-thermokarst; 6 – coefficient of talik area of the territory [35].

способствует равнинный рельеф, малое количество атмосферных осадков, слабо протекающие эрозионные процессы и наличие большого числа замкнутых озерно-аласных котловин, аккумулирующих сток с водосборных поверхностей.

Наиболее полноводны реки Лена, Алдан и Вилуй. Основную долю в формировании их стока составляют талые снеговые и дождевые воды. На подземное питание этих рек приходится около 13–17 % [36]. Большинство малых рек в регионе имеет непостоянный сток. Основной его годовой объем (80–90 %) приходится на период весеннего половодья. Летом питание малых рек происходит за счет атмосферных осадков и различных типов надмерзлотных вод. К концу теплого периода года отдельные водото-

ки пересыхают, а в зимний период на большинстве малых рек сток прекращается полностью. Минерализация воды в реках летом обычно не превышает 0,05–0,4 г/л, ее химический состав гидрокарбонатный магниевый-кальциевый, реакция среды (pH) – нейтральная (табл. 1). Зимой при отсутствии атмосферного питания, минерализация воды р. Лена увеличивается до 0,3–0,7 г/л, а ее состав становится хлоридно-гидрокарбонатный смешанный по катионам [33]. В других реках рассматриваемой территории смены химического типа по сезонам не отмечается. Для всех опробованных водотоков характерен дефицит содержания фтора.

На территории исследований широко распространены озера различного генезиса. Большин-

Основные гидрохимические показатели рек и озер Центральной Якутии

Table 1

The main hydrochemical indicators of rivers and lakes in Central Yakutia

Водные объекты Water bodies	Минерализация, г/л Total dissolved solids, g/L	Химический тип воды (по преобладающим ионам) Chemical type of water (by predominant ions)	pH	Содержание фтора, мг/л Fluorine content, mg/L
Лена, Алдан, Вилюй ($n = 74$) Lena, Aldan, Vilyui rivers ($n = 74$)	0,1–0,3	HCO ₃ Mg–Ca Cl–HCO ₃ Ca–Mg–Na	6,5–7,3	0,02–0,1
Малые реки ($n = 109$) Small rivers ($n = 109$)	0,05–0,4	HCO ₃ Mg–Ca HCO ₃ Ca–Mg	6,2–8,0	0,1–0,3
Водно-эрозионные и тукулановые озера ($n = 81$) Water-erosion and tukulan lakes ($n = 81$)	0,02–0,9	HCO ₃ Mg–Ca HCO ₃ Ca–Mg HCO ₃ Na–Mg–Ca	5,4–9,8	0,01–0,7
Эрозионно-термокарстовые и термокарстовые озера ($n = 215$) Erosion-thermokarst and thermokarst lakes ($n = 215$)	0,04–2,0	HCO ₃ Mg HCO ₃ Na–Ca–Mg HCO ₃ Na–Mg	6,0–9,8	0,2–1,1

ство из них относятся к термокарстовым и эрозионно-термокарстовым, они занимают 20–30 % территории [37, 38]. Это небольшие по площади (до 1 км²) озера с глубиной менее 2 м, полностью промерзающие в зимний период [39]. Реже встречаются термокарстовые водоемы глубиной 7–18 м [40]. Химический состав поверхностных вод в них зависит от стадии развития и проточности озерной котловины. В молодых полноводных термокарстовых водоемах вода слабоминерализована (0,6–0,8 г/л), имеет гидрокарбонатный, смешанный по катионам (обычно с преобладанием ионов кальция и магния) состав [31]. Соленость зрелых озер, как правило, превышает 1 г/л, среди анионов преобладают также гидрокарбонаты, а главными катионами становятся натрий и магний. Реакция водной среды в термокарстовых водоемах изменяется в широком диапазоне – от нейтральной до весьма щелочной, а содержание фтора – от 0,2 до 1,1 мг/л.

Водно-эрозионные озера развиты на поймах, а также на низких и средневысотных надпойменных террасах рек. Преобладающая глубина озер этого генезиса составляет 3 м, реже – до 6,3 м [41]. Химический состав их воды наследует состав поверхностных водотоков, с которыми они связаны. Вблизи г. Якутск в условиях слабой дренированности водосборной площади минерализация водоемов часто превышает 1 г/л, а в формировании их химического состава возрастает роль ионов хлора и натрия [42]. Величина

водородного показателя воды в озерах этого генезиса варьирует от слабокислой до щелочной, а содержание фтора близко к его концентрации в водотоках.

К своеобразным природным комплексам Центральной Якутии относятся массивы эоловых отложений (тукуланы). Область их распространения охватывает песчаные террасы древних и современных долин рек Вилюй, Лена и их крупных притоков. Эоловые отложения образуют дюны, как закрепленные растительностью, так и подвижные. Озера, приуроченные к древним котловинам выдувания, межгрядовым понижениям и навесным котловинам, преимущественно мелководны (глубина до 3 м). На территориях современных развееваемых песков встречаются озера глубиной до 15–25 м [43]. Часть водоемов имеет поверхностный сток или гидравлическую связь с водами межмерзлотных таликов. В бассейне р. Вилюй на площадях подвижных тукуланов озера весьма пресные (минерализация 0,02–0,03 г/л), состав гидрокарбонатный магниевый-кальциевый, реакция водной среды слабо кислая и нейтральная. На Лено-Амгинском междуречье на участках закрепленных песчаных массивов количество растворенных веществ в водоемах на порядок выше (0,2–0,9 г/л), среди катионов также преобладают гидрокарбонат-ионы, катионный состав кальциево-магниевый или смешанный, по величине водородного показателя вода нейтральная или слабо щелочная. В тукула-

новых озерах в бассейне р. Вилюй содержание фтора незначительно – 0,02–0,05 мг/л, а на правобережье р. Лена при преобладании в составе воды катионов кальция изменяется от 0,05 до 0,7 мг/л, в натриевых водах – от 0,7 до 1,7 мг/л.

Распространение надмерзлотных вод и содержание в них фтора

В Центральной Якутии к зоне свободного водообмена приурочены надмерзлотные воды сезонно-талого слоя (СТС), надмерзлотные грунтовые воды и воды надмерзлотно-межмерзлотных таликов.

Надмерзлотные воды сезонно-талого слоя формируются в мае–июне на криогенном водоупоре и обычно в декабре–феврале промерзают [44]. Водовмещающими отложениями являются современные рыхлые образования различного генезиса. Глубина залегания надмерзлотных вод СТС летом составляет 1,5–1,9 м, а мощность обводненной части разреза 0,2–1,2 м. Питание их осуществляется за счет инфильтрации атмосферных осадков, и в меньшей степени – вытаивания льда из промерзших за зиму пород и конденсации водяных паров в зоне аэрации. На площадях распространения песчаных отложений надмерзлотные воды СТС ультрапресные (минерализация 10–28 мг/л), гидрокарбонатные магниево-кальциевые, по величине рН слабокислые или нейтральные. Содержание в них фтора 0,01–0,2 мг/л. Надмерзлотные воды СТС, которые формируются в супесчано-суглинистых отложениях, обычно более минерализованы (табл. 2). В их анионном составе преобладает гидрокарбонат-ион при повышенном содержании хлора, среди катионов превалирует натрий, реакция водной среды изменяется от нейтральной до щелочной. Содержание фтора в надмерзлотных водах СТС варьирует от следовых значений до 1,4 мг/л, а на урбанизированных территориях достигает 7,7–9,3 мг/л.

Формирование состава подземных вод субаквальных таликов происходит в тесном их взаимодействии с поверхностными водами и вмещающими породами. Так, в районе г. Якутск под протоками р. Лена мощность надмерзлотных таликов 30–53 м. Водоносные породы – аллювиальные песчаные и песчано-гравийные отложения четвертичного возраста и подстилающие их терригенные песчаники и алевролиты средней юры или мела. Химический состав подземных вод аллювиального водоносного горизонта схо-

ден с составом воды р. Лена. Минерализация подрусловых вод зимой 0,6–0,8, а летом она уменьшается до 0,4–0,5 г/л [45]. Их химический состав гидрокарбонатный или хлоридно-гидрокарбонатный смешанный по катионам. Содержание фтора в подземных водах, приуроченных к аллювию, как и в р. Лена, менее 0,2 мг/л. В подстилающих алевролитах и песчаниках, фильтрационные свойства которых уступают рыхлым четвертичным отложениям, минерализация воды увеличивается до 0,9 г/л, состав ее хлоридно-гидрокарбонатный натриевый, реакция водной среды слабощелочная, а содержание фтора достигает 1,0 мг/л.

Под малыми промерзающими до дна реками подрусловые отложения, представленные суглинистыми разностями, обычно промерзают в зимний период. При наличии хорошо фильтрующих песчано-галечниковых образований и трещиноватых карбонатных пород даже при периодическом отсутствии поверхностного стока зимой могут сохраняться надмерзлотные талики. Так, под правобережными притоками р. Лена бурением установлены подрусловые талики мощностью от 5–6 до 30–60 м [31, 33, 35, 42]. Минерализация воды в них составляет 0,2–0,4 г/л, ее состав гидрокарбонатный магниево-кальциевый. Эти воды по величине водородного показателя нейтральные или слабощелочные, а содержание в них фтора менее 0,3 мг/л.

Под термокарстовыми озерами глубина таликов зависит от стадии развития озерной котловины, площади водной поверхности водоема, мощности донных биогенных илов и литологического состава подстилающих пород [46, 47]. Под промерзающими до дна озерами талые породы прослеживаются до глубины 5–10 м. Под крупными термокарстовыми водоемами мощность таликов может достигать 100 м и более. Для глубоких таликов типичен слоистый разрез. Верхнюю его часть слагают суглинки с маломощными прослоями супесей и песка, нижнюю – пески с прослоями супесей и суглинков. Эти отложения с глубиной сменяются глинами, алевролитами, аргиллитами и песчаниками либо известняками и доломитами. Химический состав воды в замкнутых таликах неоднороден по разрезу. В четвертичных отложениях минерализация воды около 0,5–1 г/л, состав гидрокарбонатный, смешанный по катионам, реакция водной среды нейтральная. С глубиной растет соленость воды, ее состав становится хлоридно-гидрокарбонат-

**Осредненные химические показатели надмерзлотных вод СТС
и надмерзлотных грунтовых вод субэкральных таликов**

Table 2

**Averaged chemical indicators of the suprapermafrost waters of the active layer
and the suprapermafrost groundwaters of subaerial taliks**

Литологический состав водоносных пород Lithological composition of water-bearing rocks	Минерализация, г/л Total dissolved solids, g/L	Химический тип воды (по преобладающим ионам) Chemical type of water (by predominant ions)	pH	Содержание фтора, мг/л Fluorine content, mg/L
<i>Надмерзлотные воды сезонного слоя</i> <i>Suprapermafrost waters of the active layer</i>				
Пески (n = 10) Sand (n = 10)	0,01–0,05	HCO ₃ Mg–Ca	6,0–7,7	0,01–0,2
Супеси, пески (n = 76) Sandy loam, sands (n = 76)	1–3	Cl–HCO ₃ Ca–Mg–Na	6,9–9,2	0,01–1,4
<i>Надмерзлотные воды субэкральных таликов</i> <i>Suprapermafrost groundwaters of subaerial taliks</i>				
Пески (n = 66) Sand (n = 66)	0,05–0,2	HCO ₃ Mg–Ca HCO ₃ Ca–Mg	7,0–8,0	0,01–0,2
Пески при наличии в зоне аэрации супесчанно-суглинистых разностей (n = 20) Sands in the presence of sandy-loamy varieties in the vadoze zone (n = 20)	0,09–0,2	HCO ₃ Mg–Ca HCO ₃ Ca–Mg	7,0–8,3	0,3–1,1
<i>Межмерзлотные воды субэкральных таликов</i> <i>Intrapermafrost groundwaters of subaerial taliks</i>				
Пески, гравийно-галечные отложения, известняки, доломиты (n = 9) Sands, gravel-pebble deposits, limestones, dolomites (n = 9)	0,1–0,2	HCO ₃ Mg–Ca HCO ₃ Ca–Mg	7,3–8,4	0,3–0,7
Пески, гравийно-галечные отложения, песчаники, алевролиты (n = 5) Sands, gravel-pebble deposits, sandstones, siltstones (n = 5)	0,2–0,5	HCO ₃ Na–Ca–Mg HCO ₃ Ca–Na Mg	7,0–8,2	0,5–1,5

ным магниевно-натриевым, pH увеличивается до 7,8–8,7. Нередко в подобных таликах встречаются гидрохимические инверсии, причинами которых являются наличие в разрезе слабопроницаемых пород и разные условия их промерзания. При отсутствии водоупорных слоев состав и минерализация воды в таликах изменяются мало [46]. Содержание фтора в пресных подземных водах обычно составляет 0,1–0,7 мг/л, в солоноватых достигает 1,0–3,2 мг/л.

Под небольшими мелководными водно-эрозийными и тукулановыми озерами мощность таликов, как правило, ограничивается 10–20 м,

а при глубине воды 2–3 м и ширине 100–200 м она увеличивается до 30–40 м [46]. В долине р. Виллой на площади распространения подвижных песков мощность чаши протаивания под озерами достигает 80–100 м и более [44]. Под проточными водоемами в четвертичных и меловых терригенных отложениях минерализация подземных вод составляет 0,4–0,8 мг/л. Их химический состав обычно сходен с поверхностными водами, реакция водной среды слабокислая или нейтральная, а содержание фтора не превышает 0,4 мг/л. На Лено-Амгинском междуречье в подозерных таликах четвертичный водо-

носный горизонт нередко гидравлически связан с кембрийским карбонатным комплексом. В нижних слоях разреза таких таликов подземные воды более минерализованы (до 0,6 г/л), их состав преимущественно гидрокарбонатный натриево-кальциевый или магниевый-натриевый, по величине рН воды нейтральные, реже слабощелочные, содержание в них фтора может достигать 1,2–1,7 мг/л (рис. 2).

В золотых отложениях средневысотных надпойменных террас рек Лена и Вилюй широко развиты субэральные водоносные надмерзлотные талики мощностью 4–15 м [44, 48–50]. Минерализация надмерзлотных грунтовых вод изменяется от 0,04–0,07 мг/л на водосборной площади р. Вилюй до 0,05–0,2 г/л в бассейне р. Лена. В составе подземных вод среди анионов преобладает гидрокарбонат-ион, среди катионов – ионы магния и кальция. Реакция водной среды изменяется от слабокислой до нейтральной. На участках, где надмерзлотный водоносный горизонт перекрывают пески, содержание фтора в водных пробах не превышает 0,1–0,2 мг/л, а при наличии в зоне аэрации супесчано-суглинистых отложений достигает 0,6 мг/л.

В областях транзита надмерзлотные грунтовые воды нередко преобразуются в межмерзлотные, а в областях разгрузки, изливаясь на поверхность, они формируют наледи [33, 48, 49]. Отличительной чертой источников, образованных водами субэральных надмерзлотно-межмерзлотных таликов, является их большая насыщенность фтором (0,5–1,5 мг/л) [51]. Важное значение в обогащении подземных вод этим элементом, помимо литологического состава водовмещающих отложений, вероятно, приобретают процессы криогенеза в очагах их разгрузки [31]. Многократные ежедневные фазовые переходы в пределах наледных долин в течение октября–мая приводят к криогенному дроблению водовмещающих горных пород и минералов на более мелкие обломки. Так, А.М. Аксюк [52], проводивший эксперименты по выщелачиванию фтора водой из раздробленных магматогенных горных пород, установил, что при комнатных температурных условиях уже в первые минуты взаимодействия раствора с порошковыми пробами пород концентрация галогена в воде увеличивается на 1,5–3,0 порядка. При этом наблюдается увеличение рН раствора от 6,2 до 7–8. Аналогичный процесс, возможно не такой интенсивности, вполне может протекать и в условиях Централь-

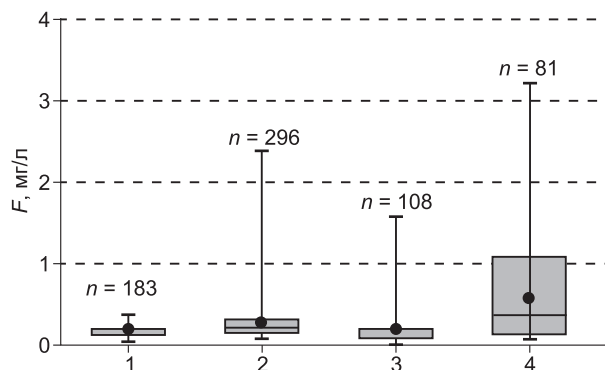


Рис. 2. Диаграмма изменения концентрации фтора в поверхностных и надмерзлотных грунтовых водах Центральной Якутии (n – количество точек опробования): 1 – в реках; 2 – в озерах; 3 – в подруслых таликах и таликах под водно-эрозийными и тукулановыми озерами; 4 – в таликах под термокарстовыми и эрозийно-термокарстовыми озерами.

Fig. 2. Diagram of changes in fluorine concentration in surface and suprapermafrost groundwaters of Central Yakutia (n is the number of sampling points): 1 – in rivers; 2 – in lakes; 3 – in channel taliks and taliks under water-erosional and tukulan lakes; 4 – in taliks under thermokarst and erosion-thermokarst lakes.

ной Якутии. На границе с мерзлыми породами при сезонной кристаллизации пресной воды повышается вероятность выпадения из раствора в осадок карбонатов кальция, которые остаются в мерзлой породе или переносятся фильтрующей водой [31, 53, 54]. Осаждение кальцита сопровождается выделением углекислоты, которая участвует в гидролитическом расщеплении кварц-полевошпатовых песков, слагающих водоносный горизонт, и активизирует переход в раствор химически активных элементов, в число которых входит фтор.

Заключение

В Центральной Якутии в поверхностных водах среднее содержание фтора, в целом, незначительно отличается от среднего значения для рек вне криолитозоны и не достигает оптимального уровня для питьевых вод. Вместе с тем, в непроточных озерах, когда в катионном составе воды более 50 % приходится на натрий-ион, концентрация фтора может превышать 1,5 мг/л.

В подземных водах несквозных субаквальных таликов в четвертичных водоносных горизонтах содержание фтора близко к его концентрации в водоемах и водотоках, с которыми связаны эти талики. При ухудшении фильтрационных свойств с глубиной и смене литологического со-

става водовмещающих пород содержание фтора в воде таликов увеличивается до 1,0–3,2 мг/л. Такое же количество этого элемента обнаруживается в надмерзлотных грунтовых водах подозерных таликов, приуроченных к термокарстовым котловинам.

Надмерзлотные воды, изначально обедненные фтором, могут насыщаться им на участках их разгрузки. Активно развивающиеся здесь процессы криогенной дезинтеграции водовмещающих пород и метаморфизации химического состава воды при фазовых переходах приводят к выпадению из раствора кальцита, повышению его pH и накоплению фтора.

Литература

1. Fordyce F.M., Vrana K., Zhovinsky E., Povoroznik V., Toth G., Hope B.C., Iljinsky U., Baker J. A health risk assessment for fluoride in Central Europe // *Environ. Geochem. Health*. 2007. Vol. 29. P. 83–102. <https://doi.org/10.1007/s10653-006-9076-7>.
2. Ozsvath D.L. Fluoride and environmental health: a review // *Rev. Environ. Sci. Biotechnol.* 2009. Vol. 8. P. 59–79. <https://doi.org/10.1007/s11157-008-9136-9>
3. Донских И.В. Влияние фтора и его соединений на здоровье населения (обзор литературных данных) // *Бюллетень ВСНЦ РАМН*. 2013. № 3 (91), ч. 1. С. 179–185.
4. WHO (World Health Organization). Guidelines for drinking-water quality: fourth edition incorporating the first addendum. Switzerland, Geneva, 2017. 631 p.
5. Yousefi M., Ghalehaskar S., Asghari F.B., Ghaderpoury A., Dehghani M.H., Ghaderpoori M., Mohammadi A.A. 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. <https://doi.org/10.1016/j.yrtph.2019.104408>.
6. *Fluoride in Drinking-water*. Background document for development of WHO Guidelines for Drinking-water Quality, World Health Organization. 2004. 17 p. WHO/SDE/WSH/03.04/96. English only.
7. Aghapour S., Bina B., Tarrahi M.J., Amiri F., Ebrahimi A. Distribution and health risk assessment of natural fluoride of drinking groundwater resources of Isfahan, Iran, using GIS // *Environmental Monitoring and Assessment*. 2018. Vol. 190. P. 137. <https://doi.org/10.1007/s10661-018-6467-z>.
8. Калужная Е.Э., Просеков А.Ю., Волобаев В.П. Генотоксические свойства фторид-иона (обзор литературы) // *Гигиена и санитария*. 2020. Т. 99, № 3. С. 253–258. <https://doi.org/10.33029/0016-9900-2020-99-3-253-258>.
9. Шварцев С.Л., Рыженко Б.Н., Алексеев В.А., Дутова Е.М., Кондратьева И.А., Копылова Ю.Г., Лепкурова О.Е. Геологическая эволюция и самоорганизация системы вода – порода. Т. 2: Система вода – порода в условиях гипергенеза. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2007. 389 с.
10. Крайнов С.Р., Швец В.М. Геохимия подземных вод хозяйственно-питьевого назначения. М.: Недра, 1987. 237 с.
11. Лиманцева О.А., Рыженко Б.Н., Черкасова Е.А. Модель формирования фтороносных вод в каменноугольных отложениях Московского артезианского бассейна // *Геохимия*. 2007. № 9. С. 981–998.
12. Thapa R., Gupta S., Gupta A., Gupta A., Reddy D.V., Kaur H. Geochemical and geostatistical appraisal of fluoride contamination: An insight into the Quaternary aquifer // *Science of the Total Environment*. 2018. Vol. 640–641, No. 1. P. 406–418. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.360>.
13. Вернадский В.И. Избранные сочинения. Т. 2. М.: Изд-во АН СССР, 1955. 615 с.
14. Янин Е.П. Фтор в окружающей среде (распространенность, поведение, техногенное загрязнение) // *Экологическая экспертиза*. 2007. № 4. С. 2–98.
15. Krauskopf K.B., Bird D.K. Introduction to Geochemistry. New York: McGraw-Hill, 1995. 647 p.
16. Wedepohl K.H. Handbook of geochemistry. Berlin: Springer-Verlag, 1969. Vol. II-1. 442 p.
17. Григорьев Н.А. Распределение химических элементов в верхней части континентальной коры. Екатеринбург: УрО РАН, 2009. 382 с.
18. Turekian K.K. Chemistry of the Earth: Holf, Rinehart and Winston Inc. USA, 1972. 136 p.
19. Химия океана. Т. 1. Химия вод океана. М.: Наука, 1979. 518 с.
20. Гордеев В.В. Речной сток в океан и черты его геохимии. М.: Наука, 1983. 160 с.
21. Гордеев В.В. Новая оценка поверхностного стока растворенных веществ в океан // *Докл. АН СССР*. 1981. Т. 261, № 5. С. 1227–1230.
22. Аничкина Н.В. Исследования биогеохимии фтора в компонентах геосистем // *Научное обозрение. Биологические науки*. 2016. № 3. С. 5–23.
23. Brindha K., Elango L. Fluoride in Groundwater: Causes, Implications and Mitigation Measures // Monroy S.D. (Ed.). *Fluoride Properties, Applications and Environmental Management*. Publisher Nova, 2011. P. 111–136.
24. Subba Rao N. Controlling factors of fluoride in groundwater in a part of South India // *Arabian Journal of Geosciences*. 2017. Vol. 10, No. 524. <https://doi.org/10.1007/s12517-017-3291-7>.
25. Malago J., Makoba E., Muzuka A.N.N. Fluoride Levels in Surface and Groundwater in Africa: A Review // *American Journal of Water Science and Engineer-*

- ing. 2017. Vol. 3, No. 1. P. 1–17. <https://doi.org/10.11648/j.ajwse.20170301.11>.
26. *Шварцев С.Л.* Гидрогеохимия зоны гипергенеза. М.: Недра, 1978. 287 с.
27. *Филимонова Л.Г.* Геохимия фтора в зоне гипергенеза областей многолетней мерзлоты. М.: Наука, 1977. 152 с.
28. *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.
29. *Кашин В.К., Афанасьева Л.В., Убугунов Л.Л.* Фтор в компонентах ландшафтов Западного Забайкалья // Агрохимия. 2015. № 10. С. 38–49.
30. *Анисимова Н.П.* Фтор в питьевых водах Центральной Якутии // Труды Сев.-Вост. отд-ния Ин-та мерзлотоведения. Якутск. 1958. Вып. 1. С. 125–133.
31. *Анисимова Н.П.* Криогидрогеохимические особенности мерзлой зоны. Новосибирск: Наука, 1981. 153 с.
32. *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.
33. *Анисимова Н.П., Павлова Н.А.* Гидрогеохимические исследования криолитозоны Центральной Якутии. Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2014. 189 с.
34. *Павлова Н.А., Федорова С.В.* Фтор в пресных и слабосолоноватых водах в области криолитозоны (Центральная Якутия) // Материалы четвертой Всероссийской научной конференции с международным участием «Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами». Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 2020. С. 171–174. <https://doi.org/10.31554/978-5-7925-0584-1-2020-171-174>.
35. *Балобаев В.Т., Иванова Л.Д., Никитина Н.М., Шепелев В.В., Ломовцева Н.С., Скутин В.И.* Подземные воды Центральной Якутии и перспективы их использования. Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2003. 137 с.
36. *Джамалов Р.Г., Кричевец Г.Н., Сафронова Т.И.* Современные изменения водных ресурсов в бассейне р. Лены // Водные ресурсы. 2012. Т. 39, № 2. С. 147–160.
37. *Иванов М.С.* Криогенное строение четвертичных отложений Лено-Алданской впадины. Новосибирск: Наука, 1984. 125 с.
38. *Жирков И.И.* Схема лимногенетической классификации озер Северо-Востока России // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2014. № 34. С. 18–25.
39. *Ушницкая Л.А., Пестрякова Л.А., Субетто Д.А., Троева Е.И.* Морфометрическая характеристика озер Лено-Амгинского междуречья // Наука и образование. 2014. № 4. С. 71–76.
40. *Аржакова С.К., Жирков И.И., Кусатов К.И., Андросов И.М.* Реки и озера Якутии: краткий справочник. Якутск: Бичик, 2007. 136 с.
41. *Городничев Р.М., Ушницкая Л.А., Ядрихинский И.В., Спиридонова И.М., Колмогоров А.И., Фролова Л.А., Пестрякова Л.П.* Морфометрические и гидрохимические особенности водно-эрозионных озер северных рек Якутии // Вестник СВФУ. 2014. Т. 11, № 6. С. 30–37.
42. *Анисимова Н.П., Павлова Н.А., Стамбовская Я.В.* Химический состав подземных вод таликов долины среднего течения реки Лены // Наука и образование. 2005. № 4. С. 92–96.
43. *Шепелев В.В.* Подземные воды тукуланов Центральной Якутии // Эоловые образования Центральной Якутии. Якутск: Издание Института мерзлотоведения СО АН СССР, 1981. С. 30–41.
44. *Шепелев В.В.* Надмерзлотные воды криолитозоны. Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2011. 169 с.
45. *Pavlova N., Ogonerov V., Danzanova M., Popov V.* Hydrogeology of Reclaimed Floodplain in a Permafrost Area, Yakutsk, Russia // Geosciences. 2020. Vol. 10(5). P. 192. <https://doi.org/10.3390/geosciences10050192>.
46. *Анисимова Н.П.* Формирование химического состава подземных вод таликов (на примере Центральной Якутии). М.: Наука, 1971. 195 с.
47. *Тишин М.И.* Геотермические условия формирования подошренных таликов в Центральной Якутии: Автореф. дисс. ... канд. геол.-мин. наук. М., 1982. 14 с.
48. *Бойцов А.В.* Особенности режима источников пресных вод Центральной Якутии в свете экологии транспортного строительства // Криолитозона и подземные воды Сибири. Ч. 2. Подземные воды и наледи. Якутск: Ин-т мерзлотоведения СО РАН, 1996. С. 46–62.
49. *Мониторинг подземных вод криолитозоны / В.В. Шепелев, А.В. Бойцов, Оберман Н.Г., Петченко М.Ф., Н.П. Анисимова и др.* Якутск: Изд-во Института мерзлотоведения СО РАН, 2002. 172 с.
50. *Лебедева Л.С., Бажин К.И., Христофоров И.И., Абрамов А.А., Павлова Н.А., Ефремов В.С., Огонеров В.В., Тарбеева А.М., Федоров М.П., Нестерова Н.В., Макарьева О.М.* Надмерзлотные субэральные талики в бассейне реки Шестаковка (Центральная Якутия) // Криосфера Земли. 2019. Т. XXIII, № 1. С. 40–50. [https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2019-1\(40-50\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2019-1(40-50)).
51. *Pavlova N., Lebedeva L., Efremov V.* Lake water and talik groundwater interaction in continuous permafrost, Central Yakutia // E3S Web Conf. 2019. Vol. 98. 07024. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199807024>.
52. *Аксюк А.М.* Режим фтора в глубинных гидротермальных флюидах и приповерхностных водах

(экспериментальные исследования): Автореф. дисс. ... докт. геол.-мин. наук. М.: Институт экспериментальной минералогии РАН, 2007. 59 с.

53. Иванов А.В. Криогенная метаморфизация химического состава природных льдов, замерзающих

и талых вод. Хабаровск; Владивосток: Дальнаука, 1998. 164 с.

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

Поступила в редакцию 22.12.2021

Поступила после рецензирования 15.02.2022

Принята к публикации 30.03.2022

Об авторах

ФЕДОРОВА Светлана Викторовна, научный сотрудник, Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова, Сибирское отделение Российской академии наук, 677010, Якутск, ул. Мерзлотная, 36, Россия, <https://orcid.org/0000-0002-3175-0918>, Researcher ID: V-9524-2018, veta_f@mail.ru

ПАВЛОВА Надежда Анатольевна, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова, Сибирское отделение Российской академии наук, 677010, Якутск, ул. Мерзлотная, 36, Россия, <https://orcid.org/0000-0001-5473-7778>, Researcher ID: W-2163-2018, na-pavlova@yandex.ru

Для цитирования

Федорова С.В., Павлова Н.А. Фтор в поверхностных и надмерзлотных водах Центральной Якутии // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2022, Т. 27, № 2. С. 233–245. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-2-233-245>

DOI 10.31242/2618-9712-2022-27-2-233-245

Fluorine in surface and suprapermafrost waters in Central Yakutia

S.V. Fedorova, N.A. Pavlova*

Melnikov Permafrost Institute SB RAS, Yakutsk, Russia

*napavlova@mpi.ysn.ru

Abstract. We studied the distribution of fluorine in fresh and slightly salty surface waters, and suprapermafrost waters in Central Yakutia. The study was based on the results of hydrochemical works carried out by employees of the Melnikov Permafrost Institute SB RAS from 1984 to 2019. According to the sanitary requirements, the optimal concentration of fluorine in drinking water is 0.5–1.0 mg/L, with its maximum concentration 1.2–1.5 mg/L. Excessive intake of fluoride leads to disorders in the musculoskeletal, neuroendocrine and cardiovascular systems, while its deficiency leads to formation of dental caries. We used chemical analyzes of water samples from the surface streams and water bodies (479 samples), and underground waters of the vadoze zone (375 samples). The analyzes of water samples in the rivers and channel taliks showed that the average content of fluorine was no more than 0.3 mg/L, which did not reach the requirement for its optimal level for drinking water. The analyzes also showed a deficiency of fluorine in the waters of lakes and taliks under erosional and tukulan lakes. However, the fluorine content exceeded 1.5 mg/L in stagnant lakes, where more than 50 % of the cationic composition of water was sodium ion. Meanwhile fluorine concentration reached 3.2 mg/L in taliks under the stagnant thermokarst lakes. The saturation of suprapermafrost waters with fluorine can occur in the area of spring discharge under the influence of cryogenic disintegration of water-bearing rocks and metamorphization of the chemical composition of water during phase transitions. They lead to the precipitation of calcite from the solution, its pH increase, and accumulation of fluorine.

Keywords: fluorine, Lena river, small rivers, lakes, taliks, supraperafrost waters, chemical composition

Acknowledgements. The research was partially supported by the Russian Foundation for Basic Research (grant number 20-05-00670). The authors are grateful to L.Yu. Boitsova and O.V. Shepeleva (PI SB RAS) for carrying out the analytical studies of water samples, Shepelev V.V. (PI SB RAS) for helpful comments.

References

1. Fordyce F.M., Vrana K., Zhovinsky E., Povoroz-nuk V., Toth G., Hope B.C., Iljinsky U., Baker J. A health risk assessment for fluoride in Central Europe // *Environ. Geochem. Health*. 2007. Vol. 29. P. 83–102. <https://doi.org/10.1007/s10653-006-9076-7>.
2. Ozsvath D.L. Fluoride and environmental health: a review // *Rev. Environ. Sci. Biotechnol.* 2009. Vol. 8. P. 59–79. <https://doi.org/10.1007/s11157-008-9136-9>
3. 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.
4. WHO (World Health Organization). Guidelines for drinking-water quality: fourth edition incorporating the first addendum. Switzerland, Geneva, 2017. 631 p.
5. Yousefi M., Ghalehaskar S., Asghari F.B., Ghaderpoury A., Dehghani M. H., Ghaderpoori M., Mohammadi A.A. 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. <https://doi.org/10.1016/j.yrtph.2019.104408>.
6. Fluoride in Drinking-water. Background document for development of WHO Guidelines for Drinking-water Quality, World Health Organization. 2004. 17 p. WHO/SDE/WSH/03.04/96. English only.
7. Aghapour S., Bina B., Tarrahi M.J., Amiri F., Ebrahimi A. Distribution and health risk assessment of natural fluoride of drinking groundwater resources of Isfahan, Iran, using GIS // *Environmental Monitoring and Assessment*. 2018. Vol. 190. P. 137. <https://doi.org/10.1007/s10661-018-6467-z>.
8. Kalyuzhnaya E.E., Prosekov A.Y., Volobaev V.P. Genotoxic properties of fluorines (review) // *Gigiyena i sanitariya* [Hygiene and Sanitation]. 2020. Vol. 99. No. 3. P. 253–258. <https://doi.org/10.33029/0016-9900-2020-99-3-253-258>.
9. Shvartsev S.L., Ryzhenko B.N., Alekseyev V.A., Dutova E.M., Kondratyeva I.A., Kopylova Yu.G., Lepokurova O.E. 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.
10. 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.
11. Limantseva O.A., Ryzhenko B.N., Cherkasova E.V. Model for the formation of fluorine-bearing rocks in the carboniferous deposits of the Moscow artesian basin // *Geokhimiya* [Geochemistry international]. 2007. No 9. P. 981–998.
12. Thapa R., Gupta S., Gupta A., Gupta A., Reddy D.V., Kaur H. Geochemical and geostatistical appraisal of fluoride contamination: An insight into the Quaternary aquifer // *Science of the Total Environment*. 2018. Vol. 640–641, No. 1. P. 406–418. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.360>.
13. Vernadsky V.I. Izbrannyye sochineniya [Selected works]. Vol. 2. Moscow: Publishing house of the Academy of Sciences of the USSR, 1955. 615 p.
14. Yanin E.P. Fluorine in the environment (prevalence, behavior, technogenic pollution) // *Ekologicheskaya ekspertiza* [Environmental Expertise]. 2007. No. 4. P. 2–98.
15. Krauskopf K.B., Bird D.K. Introduction to Geochemistry. New York: McGraw-Hill, 1995. 647 p.
16. Wedepohl K.H. Handbook of geochemistry. Berlin: Springer-Verlag, 1969. Vol. II-1. 442 p.
17. Grigoriev N.A. Raspredeleniye khimicheskikh elementov v verkhney chasti kontinental'noy kory [Distribution of chemical elements in the upper part of the continental crust]. Ekaterinburg: UB RAS, 2009. 382 p.
18. Turekian K.K. Chemistry of the Earth: Holf, Rinehart and Winston Inc. USA, 1972. 136 p.
19. Khimiya okeana. Vol. 1. Khimiya vod okeana [Ocean chemistry. Vol. 1. Chemistry of ocean waters]. Moscow: Nauka, 1979. 518 p.
20. 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.
21. Gordeev V.V. A new estimate of the surface runoff of dissolved substances into the ocean // *DAN SSSR* [Reports of the USSR Academy of Sciences]. 1981. Vol. 261, No. 5. P. 1227–1230.
22. Anichkina N.V. Research of fluorine biogeochemistry in the ecosystem components // *Nauchnoye obozreniye*. Biologicheskkiye nauki [Scientific Review. Biological Science]. 2016. No. 3. P. 5–23.
23. Brindha K., Elango L. Fluoride in Groundwater: Causes, Implications and Mitigation Measures // Monroy S.D. (Ed.). Fluoride Properties, Applications and Environmental Management. Publisher Nova, 2011. P. 111–136.
24. Subba Rao N. Controlling factors of fluoride in groundwater in a part of South India // *Arabian Journal of Geosciences*. 2017. Vol. 10, No. 524. <https://doi.org/10.1007/s12517-017-3291-7>.

25. *Malago J., Makoba E., Muzuka A.N.N.* Fluoride Levels in Surface and Groundwater in Africa: A Review // *American Journal of Water Science and Engineering*. 2017. Vol. 3, No. 1. P. 1–17. <https://doi.org/10.11648/j.ajwse.20170301.11>.
26. *Shvartsev S.L.* *Gidrogeokhimiya zony gipergeneza* [Hydrogeochemistry of the hypergenesis zone]. Moscow: Nedra, 1978. 287 p.
27. *Filimonova L.G.* *Geokhimiya flora v zone gipergeneza oblasti mnogoletney merzloty* [Fluorine geochemistry in the hypergenesis zone of permafrost regions]. Moscow: Nauka, 1977. 152 p.
28. *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.
29. *Kashin V.K., Afanasieva L.V., Ubugunov L.L.* The fluoride in components of Western Transbaikalia landscapes // *Agrokhimiya* [Eurasian Soil Science]. 2015. No. 10. P. 38–49.
30. *Anisimova N.P.* Fluorine in drinking waters of Central Yakutia // *Proceedings of the North-Eastern Branch of the Permafrost Institute*. Yakutsk: 1958. No. 1. P. 125–133.
31. *Anisimova N.P.* *Kriogidrogeokhimicheskiye osobennosti merzloy zony* [Cryohydrogeochemical features of the frozen zone]. Novosibirsk: Nauka, 1981. 153 p.
32. *Anisimova N.P., Golovanova T.V.* Fluorine content in permafrost waters of Central Yakutia and methods for reducing its concentration // *Geocryological and hydrogeological studies of Siberia*. Yakutsk: Kn. izd-vo, 1972. P. 158–163.
33. *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.
34. *Pavlova N.A., Fedorova S.V.* Fluoride levels in fresh and slightly saline waters of permafrost zone (Central Yakutia) // *Proceedings 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. <https://doi.org/10.31554/978-5-7925-0584-1-2020-171-174>.
35. *Balobaev V.T., Ivanova L.D., Nikitina N.M., Shepelev V.V., Lomovtseva N.S., Skutin V.I.* *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 branch «Geo», 2003. 137 p.
36. *Dzhamalov R.G., Krichevets G.N., Safronova T.I.* Current changes in water resources in Lena river basin // *Water resources*. 2012. Vol. 39, No. 2. P. 147–160.
37. *Ivanov M.S.* *Kriogennoye stroyeniye chetvertichnykh otlozheniy Leno-Aldanskoy vpadiny* [Cryogenic structure of the Quaternary deposits of the Lena-Aldan depression]. Novosibirsk: Nauka, 1984. 125 p.
38. *Zhirkov I.I.* Classification scheme of limnological genetic lakes North-East // *Uchenyye zapiski Rossiyskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta*. 2014. No. 34. P. 18–25.
39. *Ushnitskaya L.A., Pestryakova L.A., Subetto D.A., Troeva E.I.* *Morfometricheskaya kharakteristika ozer Leno-Amginskogo mezhdurech'ya* [Morphometric characteristics of the lakes of the Lena-Amga interfluvium] // *Nauka i obrazovaniye*. 2014. No 4. P. 71–76.
40. *Arzhakova S.K., Zhirkov I.I., Kusatov K.I., Androsov I.M.* *Reki i ozera Yakutii: kratkiy spravochnik* [Rivers and lakes of Yakutia: a short guide]. Yakutsk: Bichik, 2007. 136 p.
41. *Gorodnichev R.M., Ushnitskaya L.A., Yadrikhinskiy I.V., Spiridonova I.M., Kolmogorov A.I., Frolova L.A., Pestryakova L.A.* *Morphometrical and Hydrochemical Features of Fluvial-Erosion Lakes of Basins of the Northern Rivers of Yakutia* // *Vestnik of the North-Eastern Federal university named after M.K. Ammosov*. 2014. Vol. 11, No. 6. P. 30–37.
42. *Anisimova N.P., Pavlova N.A., Stambovskaya Y.V.* *Khimicheskiy sostav podzemnykh vod talikov doliny srednego techeniya reki Leny* [Chemical composition of groundwater taliks in the middle reaches of the Lena River] // *Nauka i obrazovaniye*. 2005. No. 4. P. 92–96.
43. *Shepelev V.V.* *Podzemnyye vody tukulanov Tsentral'noy Yakutii* [Underground waters of tukulans of Central Yakutia] // *Eolovyye obrazovaniya Tsentral'noy Yakutii* [Aeolian formations of Central Yakutia]. Yakutsk: Published by the Permafrost Institute of the Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences, 1981. P. 30–41.
44. *Shepelev V.V.* *Nadmerzlotnyye vody kriolitozony* [Suprapermafrost waters of the permafrost zone]. Novosibirsk: Academic publishing house «Geo», 2011. 169 p.
45. *Pavlova N., Ogonerov V., Danzanova M., Popov V.* *Hydrogeology of Reclaimed Floodplain in a Permafrost Area, Yakutsk, Russia* // *Geosciences*. 2020. Vol. 10(5). P. 192. <https://doi.org/10.3390/geosciences10050192>.
46. *Anisimova N.P.* *Formirovaniye khimicheskogo sostava podzemnykh vod talikov (na primere Tsentral'noy Yakutii)* [Formation of the chemical composition of groundwater taliks (by the example of Central Yakutia)]. Moscow: Nauka, 1971. 195 p.
47. *Tishin M.I.* *Geothermal conditions for the formation of suspect taliks in Central Yakutia: Avtoref. diss. ... kand. geol.-min. nauk*. Moscow, 1982. 14 p.
48. *Boytsov A.V.* *Osobennosti rezhima istochnikov presnykh vod Tsentral'noy Yakutii v svete ekologii transportnogo stroitel'stva* [Features of the regime of fresh water sources in Central Yakutia in the light of the ecology of transport construction] // *Kriolitozona i podzemnyye vody Sibiri. CH. 2. Podzemnyye vody i naledi* [Cryolithozone and underground waters of Siberia. Part 2. Groundwater and ice]. Yakutsk: Permafrost Institute SB RAS, 1996. P. 46–62.
49. *Monitoring podzemnykh vod kriolitozony* [Monitoring of ground waters of the permafrost zone] // *V.V. Shepelev*

pelev, A.B. Boytsov, N.G. Oberman, N.P. Anisimova. Yakutsk: Publishing House of the Permafrost Institute SB RAS, 2002. 172 p.

50. *Lebedeva L.S., Bazhin K.I., Khristoforov I.I., Abramov A.A., Pavlova N.A., Efremov V.S., Ogonerov V.V., Tarbeeva A.M., Fedorov M.P., Nesterova N.V., Makarieva O.M.* Suprapermafrost subaerial taliks, Central Yakutia, Shestakovka river basin // *Earth's Cryosphere*. 2019. Vol. XXIII, No. 1. P. 40–50. [https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2019-1\(40-50\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2019-1(40-50)).

51. *Pavlova N., Lebedeva L., Efremov V.* Lake water and talik groundwater interaction in continuous permafrost, Central Yakutia // *E3S Web Conf.* 2019. Vol. 98. 07024. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199807024>.

52. *Aksyuk A.M.* Fluorine regime in deep hydrothermal fluids and near-surface waters (experimental studies): Avtoref. diss. ... doktora geol.-min. nauk. Moscow: Institute of Experimental Mineralogy RAS, 2007. 59 p.

53. *Ivanov A.V.* Kriogennaya metamorfizatsiya khimicheskogo sostava prirodnykh l'dov, zamerzayushchikh i talykh vod [Cryogenic metamorphization of the chemical composition of natural ice, freezing and melt water]. Khabarovsk, Vladivostok: Dalnauka, 1998. 164 p.

54. *Fotiyev S.M.* Kriogennyy 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.

Submitted 22.12.2021

Revised 15.02.2022

Accepted 30.03.2022

About the authors

FEDOROVA, Svetlana Viktorovna, researcher, Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 36 Merzlotnaya st., Yakutsk 677010, Russia, <https://orcid.org/0000-0002-3175-0918>, Researcher ID: V-9524-2018, veta_f@mail.ru

PAVLOVA, Nadezhda Anatolievna, Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), leading researcher, Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 36 Merzlotnaya st., Yakutsk 677010, Russia, <https://orcid.org/0000-0001-5473-7778>, Researcher ID: W-2163-2018, na-pavlova@yandex.ru

For citation

Fedorova S.V., Pavlova N.A. Fluorine in surface and suprapermafrost waters in Central Yakutia // *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2022, Vol. 27, No. 2. P. 233–245. (In Russ.) <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-2-233-245>