




Фтор в почвах активных зон флюидных разгрузок Кучегэрского гидротермального поля (Байкальская рифтовая зона)

© 2026 В. Л. Убугунов , В. И. Убугунова , И. А. Павлов 

ФГБУН Институт общей и экспериментальной биологии СО РАН, ул. Сахьяновой, 6,
г. Улан-Удэ, 670047, Россия. E-mail: pavlov.igeb@yandex.ru

Цель исследования. Установить содержание валового и водорастворимого фтора в почвообразующих песках и почвах в зонах геотермальных флюидных разгрузок.

Место и время проведения. Почвенные образцы отобрали в июле 2019 г. из фоновых аллювиальных и эоловых песков Баргузинской котловины, генетических горизонтах аллювиальной почвы поймы р. Индихэн (локальный фон для Кучегэрского гидротермального поля) и почвы непосредственно в зоне флюидной разгрузки (эндокриотурбозем импрегнированный квазиглеевый засоленный).

Методы. Анализ валового содержания фтора ($F_{вал}$) в почвенных образцах проводили методом кислотного разложения с последующим измерением концентрации элемента, водорастворимой формы ($F_{подв}$) – методом ионоселективной потенциометрии после водной экстракции. Минералогический состав определили на электронном микроскопе LEO-1430 (Carl Zeiss, Германия) с энергодисперсионным спектрометром INCA Energy-350. Валовое содержание серы и вольфрама определили на атомно-эмиссионном спектрометре с индуктивно связанной плазмой (ICP-AES).

Основные результаты. Свежие аллювиальные пески, транспортируемые в котловину со склонов Баргузинского хребта горными реками Талинга и Олос, фоновые для Баргузинской депрессии плейстоценовые отложения песчаного массива «Верхний Хуйтэн» сходны между собой и состоят преимущественно из минералов гранитоидных пород. Содержание валового фтора в них (483–677 мг/кг) соответствует кларку литосферы (557 мг/кг). В слоисто-аллювиальной почве в пойме р. Индихэн (локальный фон для Кучегэрского гидротермального поля) содержание $F_{вал}$ повышено (1609–2017 мг/кг), достигая 3,6 кларка. В почвах зоны флюидной разгрузки установлена крайне высокая неоднородность концентраций и геохимическая аномалия $F_{вал}$ (3667–151667 мг/кг) и $F_{подв}$ (35,2–257,6 мг/кг). Экстрааномалии $F_{вал}$, превышающие кларк литосферы в 149–272 раза, отмечены в темном импрегнированном морфоне. В песчаных горизонтах содержание $F_{вал}$ на порядок ниже (1950–4263 мг/кг), но выше, чем в почвах поймы р. Индихэн и в фоновых степных почвах.

Заключение. Установлено околокларковое содержание фтора в фоновых песках Баргузинской котловины, повышенное – в аллювиальных почвах поймы р. Индихэн, высокое и локально аномально высокое – в почвах диапировых валов, расположенных в зоне современной геофлюидной разгрузки (Кучегэрское гидротермальное поле). Аномалию фтора можно связать с миграционными каналами дегазации геофлюидов. Неоднородное распределение фтора в почвенном профиле определяется, по предварительной оценке, путями миграции элемента в газовой фазе по хорошо проницаемым песчаным каналам дегазации с осаждением в темноцветных импрегнированных морфонах неясного генезиса с тяжелым (тяжелый суглинок, глина) гранулометрическим составом. Полученные результаты представляют интерес для теории почвообразования в районах с активными проявлениями как криогенеза, так и эндогенеза.

Ключевые слова: почвы; фтор; гидротермальная геофлюидная разгрузка; Байкальская рифтовая зона; Кучегэрские источники.

Цитирование: Убугунов В.Л., Убугунова В.И., Павлов И.А. Фтор в почвах активных зон флюидных разгрузок Кучегэрского гидротермального поля (Байкальская рифтовая зона) // Почвы и окружающая среда. 2026. Том 9. № 2. е351. DOI: [10.31251/pos.v9i2.351](https://doi.org/10.31251/pos.v9i2.351)

ВВЕДЕНИЕ

Фтор относится к группе галогенов; он самый легкий и реакционный из всех этих химических элементов. Благодаря своей высокой химической активности и широкому распространению он участвует в различных магматических, гидротермальных и приповерхностных процессах (Когарко, Кригман, 1981; Булнаев, 2002; Xiang et al., 2003; Jacks et al., 2005) и играет важную роль в биологических (влияет на физиологические процессы в живых организмах всех уровней) (Танделов, 2012; Аничкина, 2016). Отличительной особенностью фтора является очень узкий диапазон между уровнями полезного потребления и токсического воздействия (Авцын и др., 1991).

Особый интерес представляет изучение фтора в почвах одной из крупнейших в мире Центрально-Азиатской флюоритовой провинции (Забайкалье, Восточная Монголия, Северо-Западный Китай) (Жамсран и др., 1986; Булнаев, 2002; Дондоков и др., 2015), где сосредоточены многочисленные проявления и промышленные месторождения флюорита – основного концентратора фтора. Сведения о содержании фтора в почвах Байкальского рифта и прилегающих территорий немногочисленны. В почвах Селенгинского среднегорья (Иванов, Кашин, 2003; Кашин и др., 2015) его количества близки с концентрациями в почвах Западной Сибири (Пузанова и др., 1996; Ермолов, 2003; Конарбаева, 2004; Конарбаева, Смоленцева, 2023), Казахстана (Белякова, 1977), Молдавии (Крейдман, 1987), США, ФРГ, Великобритании, Японии (Kabata-Pendias, 2011), Китая (Zhu et al., 2007), Шри-Ланки (Jayawardana et al., 2012). Для Западного Забайкалья, в целом, характерна биогеохимическая аномалия фтора (Ковалевский, 1976), что связано с многочисленными месторождениями флюорита и различными флюоритсодержащими минерализациями: флюоритовой, кварц-флюоритовой, фтор-бериллиевой, молибден-вольфрамовой, редкоземельных карбонатитов (Дондоков и др., 2015; Ласточкин и др., 2021), с его повышенными концентрациями в урановых рудопоявлениях (верховье р. Баргузин, Турокчанское рудопоявление) и в полиметаллических месторождениях (северная часть оз. Байкал, Барвинское месторождение). Природными источниками фтора также являются места поверхностной разгрузки глубинных флюидов, которые часто ассоциируют с гранитоидными комплексами, тектоническими нарушениями и гидротермальными процессами (Янин, 2007). По результатам предварительных исследований нами были обнаружены локальные аномалии активности фтора в почвах зоны разгрузки Кучегэрских гидротерм (Баргузинская котловина, Байкальская рифтовая зона); с помощью сканирующей микроскопии там были выявлены нетипично высокие количества фтора на поверхности минеральных зерен, что в совокупности с фтористым составом вод Кучегэрских источников дало основание предполагать преимущественно эндогенные источники поступления элемента в составе восходящих геофлюидов. Подтверждение данной гипотезы стало целью настоящих исследований. Доказательную базу собирали с помощью количественной оценки и сравнительного анализа содержания фтора: 1) в фоновых песках; 2) в свежем песчаном аллювии горных рек в местах их выхода с Баргузинского хребта в равнинную часть долины; 3) в аллювиальных почвах и почвообразующих породах из области питания Кучегэрского гидротермального поля обломочным материалом; 4) в почвах, формирующихся непосредственно в зоне активной флюидной разгрузки с высоким содержанием фтора в термальных водах.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования проводили в Баргузинской депрессии, расположенной в северо-западной части Байкальского рифта, где ранее в зоне разгрузки Кучегэрских гидротермальных источников нами были выявлены аномалии активности фтора в почвах. В этом районе отмечается максимальный тепловой поток (Голубев, 2007) и самопроизвольный выход свободных газов (Исаев, 2006). По густой сети тектонических разломов (Лунина и др., 2009) здесь происходит разгрузка азотных термальных вод кульдурского типа, которые отличаются низкой минерализацией (0,3–0,75 г/дм³), высоким содержанием фтора (14–26 мг/дм³), кремниевой кислоты (80–85,7 мг/дм³), щелочностью (pH 9,9), термальностью (40–50°C). Среди катионов преобладает натрий, в анионном составе HCO₃⁻, SO₄²⁻ и SiO₂⁻ содержатся примерно в равных количествах. В газовом составе преобладает азот 63,3–95,5% и отмечается сильный запах сероводорода, максимальное содержание которого в расположенном немного севернее Умхейском источнике достигает 31 мг/дм³ (Ломоносов, 1974; Замана, 1992). В качестве основного объекта исследования использовали траншею КД-3, расположенную между левым берегом Кучегэрского болотного массива – коллектора гидротермальных разгрузок и небольшим замкнутым сильно переувлажненным понижением (рис. 1А, табл. 1).

Кучегэрские гидротермы способствуют формированию разнообразных форм рельефа, в том числе диапировых валов, окаймляющих грифоны (Убугунов и др., 2023). Эндогенез оказывает определяющее влияние как на морфологическое строение почв (разнообразие и специфичность сложения горизонтов в почвенном профиле, раздробленность и фрагментирование почвенных слоев на морфоны, восходящие инъекционные диапиры, насыщенные вязкой маслянистой жидкостью, криогенные турбации) (Убугунов и др., 2018; Хитров и др., 2019; Убугунов и др., 2025), так и на особенности вещественного состава (сильное засоление, нехарактерное для широтного, высотного положения территории и сопутствующих климатических условий; обогащение почвы S, W) (Убугунов и др., 2020). В современной почвенной классификации (Классификация ..., 2004) сценарий педогенеза для формирования подобных почв не описан, поэтому по ближайшей аналогии почву в траншее КД-3

на уровне авторского предложения мы отнесли к отделу турбоземов, типу эндокриотурбозем импрегнированный квазиглеевый засоленный с формулой профиля TUR[A-H-Q-IMP]s-IMP@s-Qimp-IMP2-Q2imp.

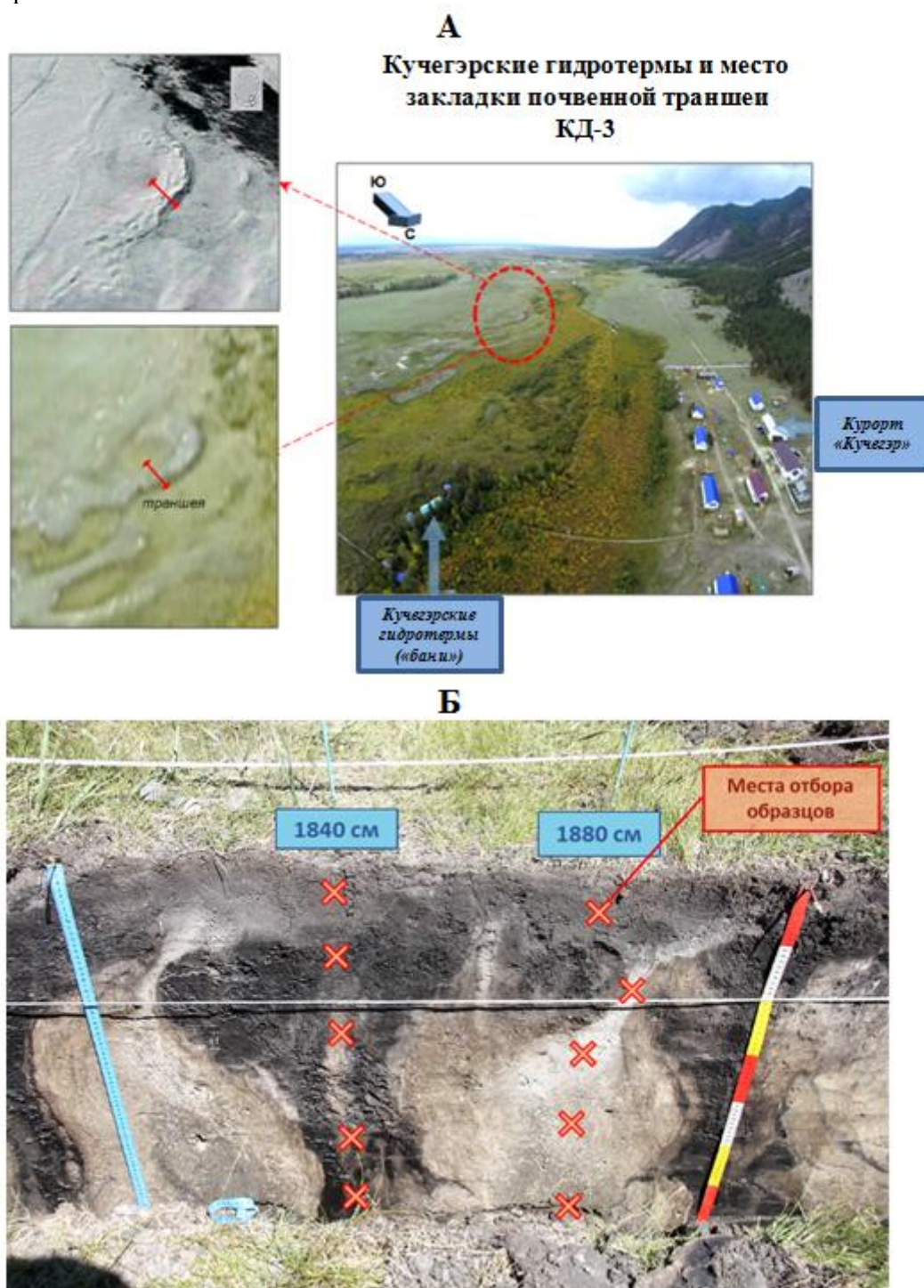


Рисунок 1. Расположение участка исследований и места закладки траншеи КД-3 (А), фрагмент восточного фланга почвенной траншеи: профильное сложение почвы на отрезке 18-19 метров и точки отбора почвенных проб (Б).

Пробы почв отбирали колонками на фрагменте траншеи от 18 до 19 м. Первая колонка располагалась на месте вертикального вытянутого темного импрегнированного морфона (IMP) на длине 18,4 м, вторая – на позиции соседнего осветленного песчаного морфона на длине 18,8 м (рис. 1Б). Образцы, фоновые для Баргузинской котловины, отбирали из свежих песчаных аллювиальных наносов в руслах пересыхающих горных рек Олос и Талинга, вытекающих с Баргузинского хребта (см. табл. 1), а также из почвообразующих пород на песчаном массиве Верхний Хуйтэн в его степной (ВКС-

1) и лесной (ВКС-26) частях. Для характеристики свежих аллювиальных отложений, поступающих с Баргузинского хребта в Кучегэрское гидротермальное поле, и первичного педогенеза в пойме р. Индихэн, в 3 км выше по течению от КД-3 был заложен почвенный разрез ИНД-1 на примитивной слоисто-аллювиальной почве, служащей локальным фоном.

Таблица 1

Географическое положение объектов исследования в Баргузинской котловине (БК)

№ п/п	Объекты исследования		№ разреза	Северной широты	Восточной долготы
1	Фон для БК	Аллювиальные пески р. Олос	–	54.853917°	110.977972°
2	Фон для БК	Аллювиальные пески р. Талинга	–	54.560319°	110.628132°
3	Фон для БК	Эоловые пески урочища Верхний Хуйтэн	ВКС-1	54.406940°	110.460810°
4	Фон для БК	Эоловые пески урочища Верхний Хуйтэн	ВКС-26	54.283610°	110.737420°
5	Локальный фон – область сноса обломочного материала	Слоисто-аллювиальная почва и песчаные аллювиальные отложения в пойме р. Индихэн	ИНД-1	54.910333°	111.000333°
6	Зона разгрузки геофлюидов	Эндокриотурбозем импрегнированный квазиглеевый засоленный в зоне влияния Кучегэрских гидротерм	КД-3	54.879111°	110.999780°

Отбор проб проведен в июле 2019 года. Этот период выбран как оптимальный для отражения стабильных почвенных характеристик, характерных для летнего сезона, когда почва находится в прогревом состоянии и завершены основные биохимические процессы весеннего периода. Для обеспечения репрезентативности данных и оценки пространственной вариабельности применили метод повторных выборок.

Анализ физико-химических и химических свойств почв выполнили стандартными общепринятыми методами (Воробьева, 1998): содержание органического углерода ($C_{орг}$) определили методом мокрого сжигания по Тюрину; состав легкорастворимых солей – в водной вытяжке 1:5; гранулометрический состав – методом Качинского; рН и активность ионов натрия – ионоселективными электродами ЭЛИС на регистрирующем иономере Экотест-120 в водах и в пастах из образцов почв и грунтов, увлажненных до 30 мас. % дистиллированной водой.

Разложение почвенных проб для определения содержания валового фтора ($F_{вал}$) проводили по методике ЦИНАО (1977): навеску почвы (1,0 г) прокаливали при 500-550°C в течение 2 ч, затем последовательно обрабатывали H_2SO_4 при нагревании до полного удаления кремния и органических компонентов; остаток растворяли в 20% HCl. При определении содержания водорастворимого фтора ($F_{подв}$) экстракцию проводили дистиллированной водой при соотношении почва : вода = 1 : 5 и времени встряхивания 15 минут (условия соответствуют общепринятой практике получения водных вытяжек). Полученную суспензию фильтровали через плотный беззольный фильтр («синяя лента»). Анализ фтора в кислотной и водной вытяжках проводили методом ионоселективной потенциометрии в соответствии с ПНД Ф 16.1.54-2008 (ФР.1.31.2017.27474). Измерения выполнили с помощью ионометра ИТАН с фторид-селективным электродом ЭЛИС-131F и вспомогательным электродом ЭВЛ-1МЗ.1 (производитель: НПП «Томьаналит», Россия). Все средства измерений внесены в Государственный реестр и прошли метрологическую поверку.

Микроструктурные особенности, взаимоотношения и однородность минералов изучили с помощью электронного микроскопа LEO-1430 (Carl Zeiss, Германия) с энергодисперсионным спектрометром INCA Energy-350. Количественное определение валового содержания серы (S) и вольфрама (W) выполнили в аккредитованной испытательной лаборатории «Республиканского аналитического центра» атомно-эмиссионным методом с индуктивно связанной плазмой (ICP) на спектрометре Spectroarcos. Для разложения почвенных образцов использовали смесь фтористоводородной (HF), хлорной ($HClO_4$) и азотной (HNO_3) кислот (ПНД Ф 16.1:2.3:3.11-98). Согласно рекомендациям Н.С. Касимова и В.Д. Власова (2015) в качестве кларка валового фтора в литосфере приняли значение 557 мг/кг, предложенное R.L. Rudnick, S. Cao (2003).

Данные, полученные в результате химического анализа смешанных почвенных проб, подвергались статистической обработке с использованием пакета прикладных программ Statistica 10.0 (TIBCO Software Inc., Palo Alto, CA, USA). Для количественной характеристики каждого измеряемого

показателя по генетическим горизонтам были рассчитаны основные дескриптивные статистики: среднее арифметическое значение и стандартное отклонение.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В районе исследования распространен гигантский по планетарным меркам Ангаро-Витимский батолит, состоящий из нескольких «сросшихся» разновозрастных гранитоидных плутонов. Содержание фтора в породах изменяется от 113 в дайках аплитов до 2617 мг/кг в габброидных породах (Гребенщикова и др., 2009). Широкий диапазон варьирования содержания этого элемента отмечался и для пород Монголии: от 300 до 2000 мг/кг (Булнаев, 2002). Наименьшее количество фтора содержится в кислых породах (дайки аплитов, автохтонные граниты), максимальное – в основных (габбро, дайки долеритов) (табл. 2).

Таблица 2

Содержание валового фтора в породах Ангаро-Витимского батолита, габбро и почвообразующих песках, мг/кг

Горные породы*							Аллювиальные пески		Эоловые пески	
1	2	3	4	5	6	7	р. Олос	р. Талинга	ВКС-1	ВКС-26
686	377	435	113	1045	625	2617	554 ± 27	483 ± 24	530 ± 26	677 ± 33

Примечание.

*1 – граниты аллохтонные; 2 – граниты автохтонные; 3 – лейкограниты; 4 – дайки аплитов; 5 – диориты, grano-диориты; 6 – дайки долеритов; 7 – габбро (по Гребенщиковой и др., 2009).

Аллювиальные пески поймы рек Талинга и Олос, эоловые песчаные отложения урочища Верхний Хуйтэн характеризуются полиминеральным составом. Частицы представлены, в основном, обломками гранитоидных пород с участием граносиенитов и сиенит-пегматитов. В минеральном составе доминируют полевые шпаты (олигоклаз, альбит, андезин) и калиевые полевые шпаты; кварц встречается редко. В примеси отмечены зерна мусковита, биотита, хлорита, эпидота, пироксена, гастингсита; среди акцессорных минералов – апатит, циркон, магнетит, титанит и рутил. Содержание валового фтора в аллювиальных песках находится на уровне кларка литосферы (483-554 мг/кг), что близко к его содержанию в окружающих горных породах. В песках урочища Верхний Хуйтэн отмечены близкие концентрации (435-677 мг/кг) (см. табл. 2). В формирующихся на них почвах (наши неопубликованные данные) лимиты варьирования несколько выше (420-1333 мг/кг), хотя в среднем (817±28 мг/кг, V=25%) уровень превышения кларка литосферы невелик и сопоставим с содержанием валового фтора в почвах Селенгинского среднегорья (Иванов, Кашин, 2003).

В фоновой слоисто-аллювиальной почве поймы р. Индихэн (разр. ИНД-1) состав минералов более разнообразен. Наиболее распространена ассоциация кварца, калиевых полевых шпатов и плагиоклазов (гранитоидные породы, 50–60% от объема); встречаются минералы основных (гастингсит, андезин, скаполит, пироксен) и средних (диориты, габбро-диориты, небольшой процент габброидов) пород. Почва имеет близкую к нейтральной реакцию среды, не засолена, характеризуется низкими содержаниями серы и вольфрама (табл. 3).

Валовой фтор по профилю варьирует в пределах 1609–2017 мг/кг (табл. 4), что превышает кларк литосферы в 3-4 раза. Возможно, что повышенное содержание фтора в локальном фоне связано с поступлением его с гидротермальными водами, разгружающимися в реку выше по течению. Содержание водорастворимого фтора низкое и составляет 0,1-0,2% от валового.

Морфология почвенного профиля в рассмотренном сегменте траншеи КД-3 имеет весьма специфические черты. Привычная почвенная горизонтальная слоистость здесь практически отсутствует. Вместо нее выражены вертикально восходящие темно-серые, почти черные (18,4 м) и светлые (18,8 м) морфоны, отдаленно напоминающие криогенные трещины. Материал темного импрегнированного морфона, заполняющий язык-«трещину», существенно отличается от верхнего гумусового горизонта, тем самым не является результатом засыпки или только засыпки: в увлажненном состоянии он имеет вязкопластичный состав, сходный с подтаявшим битумом, сильно твердеет, практически каменеет при высыхании, трескается и дробится на прочные остроугольные агрегаты. Генезис его пока остается неясным. Светлый морфон сильно осветляется в верхней части и имеет песчаный состав, резко контрастный с глинистым гор. IMP (Убугунов и др., 2025).

Таблица 3

Некоторые физико-химические свойства фоновой (р. ИНД-1) и эндогенно преобразованной (р. КД-3) почв Кучегэрского гидротермального поля

Почва	Горизонт (морфон)	Глубина, см	рН водный	Сорг, %	Сумма легкорастворимых солей, %	$^1\text{aNa}^+$, ммоль/л	Част ицы <0,01 мм		^2S , мг/кг	^2W , мг/кг
ИНД-1 (локальный фон)	Свежий раст. опад	2-0	6,0±0,1	82,8*±6,1	не опр.	0,98±0,02	не опр.			
	A	0-2	6,4±0,1	3,7±0,2	0,15±0,01	0,34±0,01	8	376±13	<5,0	
	C~"	2-10	7,0±0,2	0,7±0,0	0,04±0,00	0,08±0,01	6	134±50		
	[H]	10-18	7,4±0,3	28,5*±1,0	0,06±0,00	0,22±0,01	11	630±22		
	C~"	18-36	7,6±0,1	0,5±0,0	0,05±0,00	0,15±0,01	6	149±50		
КД-3, сегмент траншеи 18,4 м	A	0-9	7,7±0,2	4,9±0,1	0,20±0,01	38,02±1,03	25	690±23	11,2±0,4	
	IMP**s	9-20	8,6±0,3	4,1±0,0	0,93±0,02	75,86±2,05	54	1839±64	43,5±1,5	
	IMPs	20-40	8,6±0,1	2,0±0,0	1,075±0,05	87,10±3,14	46	1294±45	19,7±0,7	
	IMPs	40-60	8,4±0,2	1,0±0,0	1,45±0,03	69,18±1,12	29	613±22	8,0±0,3	
	Cimp,s	60-72	8,0±0,2	0,2±0,0	0,39±0,01	63,10±2,33	7	207±7	<5,0	
КД-3, сегмент траншеи 18,8 м	A	0-11	7,2±0,1	4,5±0,2	0,18±0,01	14,79±0,78	20	591±20	<5,0	
	Cs~"	11-25	8,9±0,3	0,4±0,0	0,97±0,04	34,67±2,11	8	164±60		
	Cs~"	25-35	8,8±0,2	0,2±0,0	0,30±0,00	25,70±1,17	6	155±50		
	Cq~"	35-54	9,0±0,1	0,20±0,0	0,22±0,01	23,44±1,12	7	122±40		
	Cq~"	54-69	8,9±0,3	0,19±0,0	0,10±0,01	19,05±0,95	5	157±50		

Примечание.

* – потеря при прокаливании; **IMP – импрегнированный горизонт. 1 – активность ионов натрия, 2 – валовое содержание серы (S) и вольфрама (W).

Таблица 4

Содержание валового ($F_{\text{вал}}$) и водорастворимого фтора ($F_{\text{подв}}$) в фоновых аллювиальных почвах поймы р. Индихэн и почвах, формирующихся в области флюидной разгрузки, мг/кг

Разрезы	Горизонт (морфон)	Глубина, см	$F_{\text{вал}}$, мг/кг	$F_{\text{подв}}$	
				мг/кг	% от $F_{\text{вал}}$
ИНД-1 (локальный фон), слоисто-аллювиальная почва	A	0-2	2017 ± 23	1,0 ± 0,1	0,1
	C~"	2-10	1609 ± 10	4,0 ± 0,2	0,2
	[H]	10-18	1773 ± 38	1,5 ± 0,1	0,1
	C~"	18-36	1800 ± 81	2,7 ± 0,1	0,1
КД-3 (сегмент 18,4 м), эндокриотурбозем	A	0-9	5719 ± 121	86,1 ± 3,5	1,5
	IMPs	9-20	151667 ± 1714	248,1 ± 9,4	0,2
	IMPs	20-40	83000 ± 8000	203,0 ± 7,9	0,2
	IMPs	40-60	36111 ± 650	257,6 ± 10,8	0,7
	Cimp,s	60-72	4683 ± 117	164,3 ± 3,5	3,5
КД-3 (сегмент 18,8 м), эндокриотурбозем	A	0-11	3667 ± 42	67,5 ± 2,7	1,8
	Cs~"	11-25	3667 ± 73	108,4 ± 6,1	3,0
	Cs~"	25-35	4263 ± 85	96,7 ± 5,1	2,3
	Cq~"	35-54	1950 ± 103	35,2 ± 0,4	1,8
	Cq~"	54-69	3667 ± 39	121,2 ± 3,6	4,4

Результаты сканирующей электронной микроскопии показали, что минералогический состав почв КД-3 значительно отличается как от песков общего фона для Баргузинской котловины, так и от локального фона. Наряду с минералами магматических, метаморфических и гидротермальных пород, в гор. IMP обнаружено большое количество амфиболов неясного генезиса, в том числе с повышенной щелочностью (рихтерит, катфорит). На данном этапе исследований наиболее логичным можно

считать поступление этих амфиболов с грязевыми массами по тектоническим разломам и трещинам вместе с восходящими гидротермальными водами. Подтверждением тому служат следующие почвенные признаки и геохимические маркеры: для морфонов на длинах траншеи 18,4 и 18,8 м характерны различные показатели гранулометрического состава, pH, aNa^+ , концентрации легкорастворимых солей, содержания серы и вольфрама. Наиболее резкие отличия по сравнению с легкими фоновыми аллювиальными почвами (ИНД-1) характерны для импрегнированного морфона (глинистый гранулометрический состав, засоление, высокое количество серы и, особенно, вольфрама) (см. табл. 3).

В почвах траншеи КД-3 отмечается экстремальная вариабельность концентрации валового фтора: от 1714 до 151667 мг/кг (см. табл. 4). Эти значения превышают кларк литосферы в 3-272 раза. Аномально высокое содержание валового фтора и его подвижной формы отмечается в импрегнированном морфоне на глубине 9-70 см. Здесь же отмечено очень высокое содержание вольфрама (см. табл. 4), большое количество амфиболов неясного генезиса. По предварительным данным электронной микроскопии на поверхности минералов фиксировался в больших количествах фтор.

На длине траншеи 18,8 м вертикально и субвертикально залегающий песчаный морфон имел морфологические и физико-химические свойства, близкие к фоновым почвам. По ассоциации минералов в нем прослеживается типичное преобладание минералов гранитных пород. Содержание валового фтора повышенное, изменяется по слоям от 1950 до 4263 мг/кг.

Распределение концентраций как валового, так и водорастворимого фтора в исследованных почвах коррелирует с содержанием легкорастворимых солей ($r=0,61$) и физической глины ($r=0,88$) аналогично почвам лесостепной и степной зон Обь-Иртышского междуречья (Ермолов, 2003). Отличительной особенностью изученных почв является отсутствие статистически значимой связи между величиной pH (6,4-9,0) и содержанием фтора (1609-151667 мг/кг) ($r=0,31$).

ОБСУЖДЕНИЕ

Высокое и аномальное содержание валового фтора в почвах, формирующихся в настоящее время в зонах влияния гидротерм Байкальской рифтовой зоны, не связано с его содержанием в горных породах и продуктах их дезинтеграции – в аллювиальных и эоловых песках. Количество фтора в первых колеблется от 113 до 2617 мг/кг (Гребенщикова и др., 2009), а в последних – от 483 до 677 мг/кг (см. табл. 2), что близко к кларку литосферы. Фтором обогащены азотные термы, которые встречаются, преимущественно, в пределах центральной части рифта, где наиболее ярко выражена неотектоническая активность, связанная с омоложенными тектоническими разломами в древних кристаллических породах, и фиксируется их связь с более глубинными флюидно-гидротермальными системами (Ломоносов, 1974). Несмотря на повышенное содержание фтора в термах, он не накапливается в почвах. Это прослеживается на флангах почвенной траншеи, контактирующих с зонами разгрузки, где влияние термальных вод наибольшее. Поэтому локальную аномалию фтора на длине 18,4 м траншеи КД-3 трудно объяснить только разгрузкой вод. С минералогической точки зрения, как известно, фтор присутствует в составе флюорита, апатита, биотита, амфиболов, флюоцерита, псевдограндрейфита, в виде примесей в титаните, но его содержание в минералах не может давать такие высокие значения в изученной почве. Учитывая, что повышенное содержание фтора в почвах имеет место в ряде районов бывшего и современного вулканизма, распространения геотермальных источников и парогазовых струй, связанных глубинными эманациями (Янин, 2007; Calas, 1979; Vellomo et al., 2003), логично предположить его поступление с разгрузками газовых или парогазовых фтор-содержащих флюидов (Когарко, Кригман, 1981). При этом основным источником фтора может быть газоземанационный перенос, в котором участие рудных и редких элементов обеспечивается высокой летучестью и растворимостью соединений типа оксифторкомплексов с щелочными катионами (Ермаков и др., 1985).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено околокларковое содержание валового фтора в аллювиальных и эоловых песках Баргузинской котловины, повышенное и высокое – в аллювиальных почвах поймы р. Индихэн и аномально высокое в эндокриотурбоземах, расположенных в зоне современной флюидной разгрузки. В импрегнированном морфоне (длина траншеи 18,4 м) на глубинах 20–40 и 40–60 см выявлена экстрааномалия фтора (в 149–272 раза выше кларка), совмещенная с аномалией индикаторного элемента глубинных разгрузок – вольфрама, концентрация которого в 3,1–43,5 раза превышает кларк. Для серы также можно выделить очень высокое ее содержание (в 1,4–1,9 раз выше кларка) по

сравнению с осветленным морфоном и фоновыми почвами, в которых сера рассеяна до 0,1-0,2 кларка. Локальная аккумуляция фтора, вольфрама, серы, легкорастворимых солей, высокое содержание щелочных амфиболов, не свойственных породному составу горного обрамления, представляет большой научный интерес для дальнейших исследований, так как может являться одним из важных доказательств поступления флюидов из недр в виде водорастворимых солей, газов и твердой фазы. Визуальные каналы дегазации легко выделяются в профиле по морфологическим свойствам, прежде всего, по осветлению окраски, характерной форме с плавными изгибами, сужениями, расширениями, вертикальному и субвертикальному направлению морфонов и очень сильному гранулометрическому контрасту с соседствующими импрегнированными морфонами. Последние конденсируют часть проходящих по каналам эндогенных веществ, аккумулируя их вплоть до аномальных и экстрааномальных значений. Полученные результаты представляют интерес для теории почвообразования в районах с активными проявлениями как криогенеза, так и эндогенеза.

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Исследование выполнено в рамках государственного задания «Биогеохимические и агрохимические свойства почв Байкальского региона, их углеродсеквестрирующий потенциал, эволюция в зонах влияния эндогенеза, мониторинг климатических и антропогенных трансформаций» № 126021217181-4.

ЛИТЕРАТУРА

- Авцын А.П., Жаворонков А.А., Риш М.А., Строчкова Л.С. Микроэлементозы человека: этиология, классификация, органопатология. Москва: Медицина, 1991. 496 с.
- Аничкина Н.В. Исследования биогеохимии фтора в компонентах геосистем // Научное обозрение. Биологические науки. 2016. № 3. С. 5–23.
- Белякова Т.М. Фтор в почвах и растениях в связи с эндемическим флюорозом // Почвоведение. 1977. № 8. С. 55–63.
- Булнаев К.Б. Источник фтора эпитермальных флюоритовых месторождений, характер его эволюции // Тихоокеанская геология. 2002. Том 21. № 5. С. 85–94.
- Воробьева Л.А. Химический анализ почв. Москва: Изд-во Московского университета, 1998. 272 с.
- Голубев В.А. Кондуктивный и конвективный вынос тепла в Байкальской рифтовой зоне. Новосибирск: Гео, 2007. 222 с.
- Гребенщикова В.И., Носков Д.А., Герасимов Н.С. Геохимия и условия формирования Ангаро-Витимского гранитоидного батолита // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2009. № 3(39). С. 24–30.
- Дондоков З.Б.-Д., Потапов Л.В., Кислов Е.В. Минерально-сырьевой комплекс Республики Бурятия: состояние и перспективы // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 2015. № 6. С. 43–51.
- Ермаков Н.П., Рябов В.А., Щербаков Ю.П. Геохимические методы поиска рудных месторождений. Москва: Недра, 1985. 320 с.
- Ермолов Ю.В. Фтор в почвах лесостепной и степной зон Обь-Иртышского междуречья // Почвоведение. 2003. № 6. С. 692–696.
- Жамсран М., Лхамсурен Ж., Оболенский А.А., Бадамгарав Ж., Батжаргал Ш., Оболенская Р.В., Туменбаяр Б., Цоодол Б., Шийтэр Н. Металлогения Монгольской Народной Республики. Новосибирск, Наука. 1986. 48 с.
- Замана Л.В. Гидрогеохимические аномалии фтора в Забайкалье // Геохимия. 1992. № 2. С. 228–237.
- Иванов Г.М., Кашин В.К. Фтор в почвах Забайкалья // Почвоведение. 2003. № 3. С. 158–163.
- Исаев В.П. Природные газы Баргузинской впадины. Иркутск: Изд-во Иркутского государственного университета, 2006. 220 с.
- Касимов Н.С., Власов Д.В. Кларки химических элементов как эталоны сравнения в экогеохимии // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2015. № 2. С. 7–17.
- Кашин В.К., Афанасьева Л.В., Убугунов Л.Л. Фтор в компонентах ландшафтов Западного Забайкалья // Агрохимия. 2015. № 10. С. 39–49.
- Классификация и диагностика почв России / Шишов Л.Л., Тонконогов В.Д., Лебедева И.И., Герасимова М.И. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.

- Ковалевский А.Л. Биогеохимические ореолы фтора в Забайкалье // Геология рудных месторождений. 1976. Том 18. № 4. С. 97–101.
- Когарко Л.Н., Кригман Л.Д. Фтор в силикатных расплавах и магмах. Москва: Наука, 1981. 125 с.
- Конарбаева Г.А. Галогены в почвах юга Западной Сибири. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2004. 200 с.
- Конарбаева Г.А., Смоленцева Е.Н. Фтор и йод в почвах Кулундинской равнины // Почвоведение. 2023. № 2. С. 170–183. <https://doi.org/10.31857/S0032180X22600792>
- Крейдман Ж.Е. Распределение фтора в черноземах, каштановых и пойменных почвах Молдавии // География и природные ресурсы. 1987. № 2. С. 70–74.
- Ласточкин Е.И., Рипп Г.С., Цыденова Д.С., Посохов В.Ф., Мурзинцева А.Е. Эпитермальные флюоритовые месторождения Забайкалья (геохимические особенности, источники вещества и флюидов, проблемы генезиса) // Геология и геофизика. 2021. Том 62. № 4. С. 514–527. <https://doi.org/10.15372/GiG2020113>
- Ломоносов И.С. Геохимия и формирование современных гидротерм Байкальской рифтовой зоны. Новосибирск: Наука, 1974. 168 с.
- Лунина О.В., Гладков А.С., Неведрова Н.Н. Рифтовые впадины Прибайкалья: тектоническое строение и история развития Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2009. 316 с.
- Пузанова О.Ю., Мальгин М.А., Пузанов А.В. Педогеохимия фтора в сухостепных котловинах юго-восточного Алтая // География и природные ресурсы. 1996. № 2. С. 90–94.
- Танделов Ю.П. Фтор в системе почва–растение. Красноярск: РАСХН, 2012. 146 с.
- Убугунов В.Л., Хитров Н.Б., Убугунова В.И., Жамбалова А.Д., Рупышев Ю.А., Аюшина Т.А., Парамонова А.Е., Цыремпилов Э.Г., Насатуева Ц.Н. Эндогенный фактор и морфогенетическое строение почв в зоне влияния Кучигерских гидротерм (Байкальская рифтовая зона, север Баргузинской котловины) // Природа Внутренней Азии. 2018. № 4(9). С. 54–72. <https://doi.org/10.18101/2542-0623-2018-4-54-72>
- Убугунов В.Л., Убугунова В.И., Жамбалова А.Д. Эндогенные факторы формирования и функционирования галоморфных почв Байкальской рифтовой зоны (на примере Баргузинской котловины) // География и природные ресурсы. 2020. № 2(161). С. 99–108. [https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2020-2\(99-108\)](https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2020-2(99-108))
- Убугунов В.Л., Убугунова В.И., Хитров Н.Б., Ямнова И.А., Лебедева М.П., Насатуева Ц.Н. Почвоподобные образования диапировых конструкций Байкальской рифтовой зоны // Природа Внутренней Азии. 2023. № 1(23). С. 79–97. <https://doi.org/10.18101/2542-0623-2023-1-79-97>
- Убугунов В.Л., Ямнова И.А., Убугунова В.И., Хитров Н.Б., Лебедева М.П. Органическое вещество эндогенных почв Кучегэрского термального поля (Баргузинская котловина, Забайкалье): формы и внутривертикальное распределение // Природа внутренней Азии. 2025. № 2(31). С. 61–78. <https://doi.org/10.18101/2542-0623-2025-2-61-78>
- Хитров Н.Б., Убугунов В.Л., Убугунова В.И., Рупышев Ю.А., Аюшина Т.А., Жамбалова А.Д., Жамбалова А.Д., Цыремпилов Э.Г., Парамонова А.Е., Насатуева Ц.Н. Морфологическое строение почв в ближайшей зоне влияния Кучигерских гидротерм (Баргузинская котловина) // Почвоведение. 2019. № 12. С. 1430–1453. <https://doi.org/10.1134/S0032180X19120074>
- ЦИНАО. Методические указания по определению валового микроэлементов в почвах и растениях. Москва: ЦИНАО, 1977. 35 с.
- Янин Е.П. Фтор в окружающей среде (распространенность, поведение, техногенное загрязнение) // Экологическая экспертиза. 2007. № 4. С. 2–98.
- Bellomo S., D'Alessandro W., Longo M. Volcanogenic fluorine in rainwater around active degassing volcanoes: Mt. Etna and Stromboli Island, Italy // Science of the Total Environment. 2003. Vol. 301. No. 1–3. P. 175–185. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(02\)00284-X](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(02)00284-X)
- Calas G. Etude expérimentale du comportement de l'uranium dans les magmas: Etats d'oxydation et de coordinance // Geochimica et Cosmochimica Acta. 1979. Vol. 43. No. 9. P. 1521–1531. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(79\)90145-5](https://doi.org/10.1016/0016-7037(79)90145-5)
- Jacks G., Bhattacharya P., Chaudhary V., Singh K. Controls in the genesis of some high-fluoride groundwaters in India // Applied Geochemistry. 2005. Vol. 20. No. 2. P. 221–228. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2004.07.002>
- Jayawardana D.T., Pitavala H.M.T., Ishida H. Geochemical assessment of soils in districts of fluoride-rich and fluoride-poor groundwater, northcentral Sri Lanka // Journal of Geochemical Exploration. 2012. Vol. 114. P. 118–125. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2012.01.004>

Rudnick R.L., Cao S. Compositoin of the continental crust // Treatise on Geochemistry. 2003. Vol. 3. P. 1–64. <https://doi.org/10.1016/B0-08-043751-6/03016-4>

Xiang Q., Liang Y., Chen L. Effect of fluoride in drinking water on childrens intelligence // Fluoride. 2003. Vol. 36. No. 2. P. 84–94.

Zhu L., Zhhang H.H., Xia B., Xu D.R. Total fluoride in Guangdong soil profiles China: spatial distribution and vertical variation // Environment International. 2007. Vol. 33. No. 3. P. 302–308. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2006.10.010>

Kabata-Pendias A. Trace elements in soils and plants. 4th ed. Boca Raton. London–N.Y.: CRC Press/Taylor and Francis Group, 2011. 548 p. <https://doi.org/10.1017/S0014479711000743>

Поступила в редакцию 14.01.2026

Принята 03.03.2026

Опубликована 31.03.2026

Сведения об авторах:

Убугунов Василий Леонидович – кандидат биологических наук, заместитель директора ФГБУН Институт общей и экспериментальной биологии СО РАН (г. Улан-Удэ, Россия); ubugunovv@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7899-1906>

Убугунова Вера Ивановна – доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории биогеохимии и экспериментальной агрохимии ФГБУН Институт общей и экспериментальной биологии СО РАН (г. Улан-Удэ, Россия); ubugunova57@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0008-1399-8283>

Павлов Игорь Артурович – кандидат фармацевтических наук, младший научный сотрудник лаборатории биогеохимии и экспериментальной агрохимии ФГБУН Институт общей и экспериментальной биологии СО РАН (г. Улан-Удэ, Россия); pavlov.igeb@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0008-5773-8993>

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.



Статья доступна по лицензии [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Fluorine in Soils of Active Fluid Discharge Zones of the Kucheger Hydrothermal Field (Baikal Rift Zone)

© 2026 V. L. Ubugunov , V. I. Ubugunova , I. A. Pavlov 

Institute of General and Experimental Biology, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Sakhyanovoy St. 6, Ulan-Ude, 670047, Russia. E-mail: pavlov.igeb@yandex.ru

The aim of the study objective. To investigate the total (F_{tot}) and water-soluble fraction (F_{WSF}) of fluorine in soil-forming sands and soils in geothermal fluid discharge zones.

Location and time of the study. Soil samples were taken in July 2019 from the background alluvial and Aeolian sands of the Barguzin basin, the alluvial soil of the Indihen River (local background for the Kucheger hydrothermal field), and the soil directly in the fluid discharge zone (impregnated quasi-clay saline endocrioturbozem).

Methods. The total fluorine content in soil samples was measured by acid decomposition followed by measurement of the element concentration. The determination of the F_{WSF} was performed by ion-selective potentiometry after water extraction. The mineralogical composition was studied using a LEO-1430 electron microscope (Carl Zeiss, Germany) with an INCA Energy-350 energy dispersion spectrometer. The total S and W contents were determined by an inductively coupled plasma atomic emission spectrometer (ICP-AES).

Main results. Fresh alluvial sands transported to the basin from the slopes of the Barguzin range by the mountain rivers (Talinga and Olos rivers) and the Pleistocene deposits of the “Verkhny Huiten” sandy massif, which are background for the Barguzin depression, are similar to each other and consist mainly of granitoid minerals. The fluorine content in them (483–677 mg/kg) corresponds to the clark of the lithosphere (557 mg/kg). In layered alluvial soil in the floodplain of the Indihen River (soil section IND-1 is the local background for the Kucheger hydrothermal field) the F_{tot} content was increased (1609–2017 mg/kg), reaching 3,6 Clarke. The soils of the fluid discharge zone soil section showed extremely high heterogeneity of concentrations and geochemical anomalies of F_{tot} (3667–151667 mg/kg) and F_{WSF} (35,2–257,6 mg/kg). F_{tot} extraanomalial (Clarke excess of the lithosphere in 149–272 times) were obtained for the dark impregnated soil horizon. In the sandy horizons, the element content was orders of magnitude lower (1950–4263 mg/kg), but higher than the concentrations of F_{tot} in the soils of the Indihen River floodplain and in the background steppe soils.

Conclusion. The fluorine content was found to be near Clarke in the background sands of the Barguzin basin, increased in the alluvial soils of the Indihen River, and high and locally abnormally high in the soils of the diapir shafts located in the zone of modern geofluidic discharge (the Kucheger hydrothermal field). We believe the fluorine anomaly to be associated with migration channels of geofluid degassing. The heterogeneous distribution of F in the soil profile is determined, according to our preliminary assessment, by the migration routes of the element in the gas phase through well-permeable sandy degassing channels with deposition in dark-colored impregnated horizons of unknown genesis with a heavy (heavy loam, clay) granulometric composition. The obtained results are of interest for pedology of the areas with active cryo- and endogenesis.

Keywords: soils; fluorine; hydrothermal geofluid discharge; Baikal Rift Zone; Kucheger springs.

How to cite: Ubugunov V.L., Ubugunova V.I., Pavlov I.A. Fluorine in soils of active fluid discharge zones of the Kucheger hydrothermal field (Baikal rift zone). *The Journal of Soils and Environment*. 2026. 9(2). e351. DOI: [10.31251/pos.v9i2.351](https://doi.org/10.31251/pos.v9i2.351) (in Russian with English abstract).

FUNDING

This study was performed in the frame of the state assignment of the Institute of General and Experimental Biology SB RAS «Biogeochemical and agrochemical properties of soils in the Baikal region, their carbon sequestration potential, evolution in areas affected by endogenesis, and monitoring of climatic and anthropogenic transformations» № 126021217181-4.

REFERENCES

- Avtsyn A.P., Zhavoronkov A.A., Rish M.A., Strochkova L.S. Human Microelementoses: Etiology, Classification, organopathology. Moscow: Meditsina, 1991. 496 p. (in Russian).
- Anichkina N.V. Research of fluorine biogeochemistry in the ecosystem components. Scientific Review. Biological Sciences. 2016. No. 3. P. 5–23. (in Russian).
- Belyakova T.M. Fluorine in soils and plants in connection with endemic fluorosis. *Pochvovedenie*. 1977. No. 8. P. 55–63. (in Russian).
- Bulnaev K.B. The source of fluorine from epithermal fluorite deposits, and the character of its evolution. *Tikhookeanskaya Geologiya*. 2002. Vol. 21. No. 5. P. 85–94. (in Russian).
- Vorobyeva L.A. Chemical analysis of soils. Moscow: Moscow State University Press, 1998. 272 p. (in Russian).
- Golubev V.A. Conductive and convective heat transfer in the Baikal Rift zone. Novosibirsk: Geo, 2007. 222 p. (in Russian).
- Grebenshchikova V.I., Noskov D.A., Gerasimov N.S. Geochemistry and formation conditions of Angaro-Vitimskii granitoid batholite (Pribaikalje). Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2009. No. 3(39). P. 24–30. (in Russian).
- Dondokov Z.B.-D., Potapov L.V., Kislov E.V. The mineral resource sector in the republic of Buryatia: current state and further development. *Mineral Recourses of Russia. Economics and Management*. 2015. No. 6. P. 43–51. (in Russian).
- Ermakov N.P., Ryabov V.A., Shcherbakov Yu.P. Geochemical methods for ore deposit prospecting. Moscow: Nedra Publ., 1985. 320 p. (in Russian).
- Ermolov Yu.V. Fluorine in soils of forest-steppe and steppe zones of the Ob-Irtysh interfluve. *Eurasian Soil Science*. 2003. Vol. 36. No. 6. P. 619–623.
- Zhamsran M., Lkhamsuren Zh., Obolenskiy A.A., Badamgarav Zh., Batzhargal Sh., Obolenskaya R.V., Tumenbayar B., Tsodol B., Shiiter N. Metallogeny of the Mongolian People's Republic. Novosibirsk: Nauka Publ., 1986. 48 p. (in Russian).
- Zamana L.V. Fluorine hydrogeological anomalies in Transbaikalia. *Geohimiya*. 1992. No. 2. P. 228–237. (in Russian).
- Ivanov G.M., Kashin V.K. Fluorine contents in soils of the Transbaikal region. *Eurasian Soil Science*. 2003. Vol. 36. No. 2. P. 149–154.
- Isaev V.P. Natural gases of the Barguzin depression. Irkutsk: Publishing House of Irkutsk State University, 2006. 220 p. (in Russian).
- Kasimov N.S., Vlasov D.V. Clarkes of chemical elements as comparison standards in ecogeochemistry. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5. Geografiya*. 2015. No. 2. P. 7–17. (in Russian).
- Kashin V.K., Afanasyeva L.V., Ubugunov L.L. The fluoride in components of Western Transbaikalia landscapes. *Agrokhiimia*. 2015. No. 10. P. 39–49. (in Russian).

- Classification and diagnostics of soils of Russian / Authors and compilers: L.L. Shishov, V.D. Tonkonogov, I.I. Lebedeva, M.I. Gerasimov. Smolensk: Oykumena Publ., 2004. 342 p. (in Russian).
- Kovalevskiy A.L. Biogeochemical halos of fluorine in Transbaikalia. *Geologiya Rudnyh Mestorozhdenij*. 1976. Vol. 18. No. 4. P. 97–101. (in Russian).
- Kogarko L.N., Krigman L.D. Fluorine in Silicate Melts and Magmas. Moscow: Nauka Publ., 1981. 125 p. (in Russian).
- Konarbaeva G.A. Halogens in Soils of the South of Western Siberia. Novosibirsk: Publishing House of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2004. 200 p. (in Russian).
- Konarbaeva G.A., Smolentseva E.N. Fluorine and iodine in soils of the Kulunda Plain. *Eurasian Soil Science*. 2023. Vol. 56. No. 2. P. 147–159. <https://doi.org/10.1134/s1064229322602116>
- Kreydman Zh.E. Distribution of fluorine in chernozems, chestnut, and floodplain soils of Moldova. *Geografia i prirodnye resursy*. 1987. No. 2. P. 70–74. (in Russian).
- Lastochkin E.I., Ripp G.S., Tsydenova D.S., Posokhov V.F., Murzintseva A.E. Epithermal fluorite deposits in transbaikalia (Geochemical features, sources of matter and fluids, and genesis). *Russian Geology and Geophysics*. 2021. – Vol. 62. No. 4. P. 415–426. <https://doi.org/10.2113/RGG20194128>
- Lomonosov I.S. Geochemistry and Formation of Modern Hydrotherms of the Baikal Rift Zone. Novosibirsk: Nauka Publ., 1974. 168 p. (in Russian).
- Lunina O.V., Gladkov A.S., Nevedrova N.N. Rift Depressions of the Baikal Region: Tectonic Structure and History of Development. Novosibirsk: Academic Publishing House «Geo», 2009. 316 p. (in Russian).
- Puzanova O.Yu., Mal'gin M.A., Puzanov A.V. Pedogeochemistry of fluorine in the dry-steppe basins of the south-eastern Altai. *Geografia i prirodnye resursy*. 1996. No. 2. P. 90–94. (in Russian).
- Tandelov Yu.P. Fluorine in the Soil-Plant System. Krasnoyarsk: Russian Academy of Agricultural Sciences, 2012. 146 p. (in Russian).
- Ubugunov V.L., Khitrov N.B., Ubugunova V.I., Zhambalova A.D., Rupyshev Yu.A., Ayushina T.A., Paramonova A.E., Tsyrempilov E.G., Nasatueva Ts.N. Endogenous factor and morphogenetic structure of soils in the zone of influence of Kuchiger hydrotherms (Baikal rift zone, north of the Barguzin basin). *Nature of Inner Asia*. 2018. No. 4(9). P. 54–72. (in Russian). <https://doi.org/10.18101/2542-0623-2018-4-54-72>
- Ubugunov V.L., Ubugunova V.I., Zhambalova A.D. Endogenous factors for the formation and functioning of halomorphic soils in the Baikal rift zone (a case study of the Barguzin depression). *Geography and Natural Resources*. 2020. No. 2(161). P. 99–108. [https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2020-2\(99-108\)](https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2020-2(99-108))
- Ubugunov V.L., Ubugunova V.I., Khitrov N.B., Yamnova I.A., Lebedeva M.P., Nasatueva Ts.N. Soil-like formations of diapiric structures in the Baikal rift zone. *Nature of Inner Asia*. 2023. No. 1(23). P. 79–97. (in Russian). <https://doi.org/10.18101/2542-0623-2023-1-79-97>
- Ubugunov V.L., Yamnova I.A., Ubugunova V.I., Khitrov N.B., Lebedeva M.P. Organic matter of endogenous soils of the Kucheger thermal field (Barguzin basin, Transbaikalia): forms and intraprofile distribution. *Nature of Inner Asia*. 2025. No. 2(31). P. 61–78. (in Russian). <https://doi.org/10.18101/2542-0623-2025-2-61-78>
- Khitrov N.B., Ubugunov V.L., Ubugunova V.I., Rupyshev Y.A., Ayushina T.A., Zhambalova A.D., Tsyrempilov E.G., Paramonova A.E., Nasatueva T.N. Morphology of soils in the impact zone of Kuchiger hot springs, the Barguzin depression. *Eurasian Soil Science*. 2019. Vol. 52. No. 12. C. 1477–1498. <https://doi.org/10.1134/S106422931912007X>
- TSINAO. Methodological guidelines for the determination of gross microelements in soils and plants. Moscow: TSINAO, 1977. 35 p. (in Russian).
- Yanin E.P. Fluorine in the environment (occurrence, behavior, anthropogenic pollution). *Environmental Expert Examination*. 2007. No. 4. P. 2–98. (in Russian).
- Bellomo S., D'Alessandro W., Longo M. Volcanogenic fluorine in rainwater around active degassing volcanoes: Mt. Etna and Stromboli Island, Italy. *Science of the Total Environment*. 2003. Vol. 301. № 1–3. P. 175–185. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(02\)00284-X](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(02)00284-X)
- Calas G. Etude expérimentale du comportement de l'uranium dans les magmas: Etats d'oxydation et de coordinance. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1979. Vol. 43. No. 9. P. 1521–1531. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(79\)90145-5](https://doi.org/10.1016/0016-7037(79)90145-5)
- Jacks G., Bhattacharya P., Chaudhary V., Singh K. Controls in the genesis of some high-fluoride groundwaters in India. *Applied Geochemistry*. 2005. Vol. 20. No. 2. P. 221–228. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2004.07.002>

Jayawardana D.T., Pitavala H.M.T., Ishida H. Geochemical assessment of soils in districts of fluoride-rich and fluoride-poor groundwater, northcentral Sri Lanka. *Journal of Geochemical Exploration*. 2012. Vol. 114. P. 118–125. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2012.01.004>

Rudnick R.L., Cao S. Compositoin of the continental crust. *Treatise on Geochemistry*. 2003. Vol. 3. P. 1–64. <https://doi.org/10.1016/B0-08-043751-6/03016-4>

Xiang Q., Liang Y., Chen L. Effect of fluoride in drinking water on childrens intelligence. *Fluoride*. 2003. Vol. 36. No. 2. P. 84–94.

Zhu L., Zhhang H.H., Xia B., Xu D.R. Total fluoride in Guangdong soil profiles China: spatial distribution and vertical variation. *Environment International*. 2007. Vol. 33. No. 3. P. 302–308. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2006.10.010>

Kabata-Pendias A. Trace elements in soils and plants. 4th ed. Boca Raton. London–N.Y.: CRC Press/Taylor and Francis Group, 2011. 548 p. <https://doi.org/10.1017/S0014479711000743>

Received 14 January 2026

Accepted 03 March 2026

Published 31 March 2026

About the authors:

Vasily L. Ubugunov – Candidate of the Biological Sciences, Deputy Director of the Institute of General and Experimental Biology, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Ulan-Ude, Russia); ubugunovv@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7899-1906>

Vera I. Ubugunova – Doctor of the Biological Sciences, Leading Researcher, Laboratory of Biogeochemistry and Experimental Agrochemistry, Institute of General and Experimental Biology, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Ulan-Ude, Russia); ubugunova57@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0008-1399-8283>

Igor A. Pavlov – Candidate of the Pharmaceutical Sciences, Junior Researcher, Laboratory of Biogeochemistry and Experimental Agrochemistry, Institute of General and Experimental Biology, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Ulan-Ude, Russia); pavlov.igeb@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0008-5773-8993>

The authors read and approved the final manuscript



The article is available under [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)