

## Содержание и распределение фтора в почвенных катенах Кулундинской равнины

Б. А. СМОЛЕНЦЕВ, Г. А. КОНАРБАЕВА, Н. В. ЕЛИЗАРОВ, В. В. ПОПОВ

Институт почвоведения и агрохимии СО РАН  
630090, Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 8/2  
E-mail: smolentsev.b@issa-siberia.ru

Статья поступила 29.08.2023

После доработки 10.11.2023

Принята к печати 05.12.2023

### АННОТАЦИЯ

Изучено содержание и распределение фтора в двух почвенных катенах, расположенных в бассейнах рек Бурла и Кулунда на территории Кулундинской равнины. Использование метода катен позволило сравнить содержание фтора в почвах разных геохимических позиций рельефа, в зональных и интразональных почвах. По аналогии с другими элементами значение имеет не просто присутствие фтора в объектах окружающей среды, в том числе в почвах, а его концентрации, лежащие в основе двойственного характера их биологической роли – положительной или отрицательной, что требует введения санитарно-гигиенических нормативов на их содержание. В изученных почвах валовое содержание фтора варьирует в диапазоне от 13,9 до 711,03 мг/кг, водорастворимой формы – в пределах от следов до 34,65 мг/кг. Выявлено, что в засоленных солонцах, развивающихся в супераквальных ландшафтах, содержание валового и водорастворимого фтора имеет соответственно экологически критические и недопустимые концентрации, поэтому использование данных почв в сельскохозяйственном производстве сопряжено с риском накопления избыточного количества фтора в организме животных и человека.

**Ключевые слова:** почвенная катена, солонцы, Кулундинская равнина, валовой фтор, водорастворимый фтор.

### ВВЕДЕНИЕ

Взаимоотношения живых организмов и природной среды являются одной из важнейших проблем современной биологии, поэтому изучение влияния химического состава почв на жизнедеятельность живых организмов, в том числе человека, посредством растений имеет научное и практическое значение. Галогены (фтор, хлор, бром и йод) относятся к микроэлементам, необходимым для нормальной жизнедеятельности живых организмов, что требует их детального исследования в при-

родных объектах. Данная работа посвящена изучению содержания и распределения фтора в почвенных катенах Кулундинской равнины. Фтор – широко распространенный элемент, его кларк в земной коре достигает  $(625-660) \cdot 10^{-4} \%$ , а среднее содержание в почвах мира составляет около 0,02 % [Добровольский, 1983]. С экологической точки зрения важным является не присутствие фтора в объектах окружающей среды, а его концентрации, лежащие в основе двойственного характера его биологической роли. При дефиците

фтора в организме человека снижается устойчивость зубной эмали, что приводит к разрушению зубов (кариес), а избыток приводит к эндемическому флюорозу и остеопорозу [Авцын, 1991; Cronin et al., 2000; Loganathan et al., 2001; Jezierska-Madziar, Pinskiwar, 2003; Sariñana-Ruiz et al., 2017]. В литературе приведены данные, указывающие на способность чайных деревьев активно поглощать фтор, что может привести к хронической интоксикации организма человека при длительном употреблении чая [Huang et al., 2020].

Избыток фтора в организме животных также опасен снижением активности ферментов и развитием эндемического флюороза у крупного рогатого скота [Баранова, Шкуратова, 2012; Choubisa, 2023]. При этом имеются данные, что развитие флюороза у человека при избытке фтора в воде и почве имеет более стремительный и масштабный характер, чем у животных [Nabiyakare et al., 2021].

Роль фтора в метаболизме растений детально не установлена, однако его повышенные концентрации тормозят рост и развитие растений и, как следствие, снижают их продуктивность, подавляют синтез крахмала и уменьшают содержание хлорофилла [Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989; Шелепова, Потатуева, 2003]. Экспериментально установлено, что высокие концентрации фтора ингибируют рост бобов и кукурузы [Cui, Yang, 2021]. Выявлено негативное влияние фтора на количество и биомассу микроскопических грибов [Redkina et al., 2020]. В то же время известно, что некоторые растения способны аккумулировать фторсодержащие соединения, накопление которых в товарной части сельскохозяйственной продукции представляет особую опасность для животных и человека [Горностаева, Фукс, 2017].

По мнению некоторых исследователей [Савенко, 2018], почвы служат источником поступления фтора в атмосферу, поэтому существует экологический риск, связанный с потенциальным выбросом фтора из почвы.

Основным источником обогащения почв фтором считается выветривание горных пород, содержащих фторапатит, флюорит, биотит и др. Однако в настоящее время все большее значение приобретают выбросы промышленных предприятий (преимущественно производящих алюминий [Евдокимова, Моз-

гова, 2015]), а также многолетнее применение фторсодержащих минеральных удобрений (содержание F в аммофосе 3,5–4,0 %, в суперфосфате – до 1,5 %) и мелиорантов (например, фосфогипса). При поступлении различных вредных веществ в воду или воздух их концентрация постепенно снижается благодаря интенсивному разбавлению, тогда как в почве, напротив, увеличивается из-за аккумуляции. Поэтому с экологической точки зрения необходимо знать распределение галогена в ландшафте, направление и скорость его миграции.

Экологически допустимым уровнем валового содержания фтора в почвах считается от 0 до 500 мг/кг, критическим – 500–1000 мг/кг, недопустимым – более 1000 мг/кг [Гапонюк, Кузнецова, 1984].

Приоритетную роль в процессах аккумуляции и связывания фтора в почве играют: реакция почвенной среды, гранулометрический состав почв (особенно илистая фракция) и водный режим, что было установлено предыдущими исследователями и подтверждено рядом работ [Omueti, Jones, 1980; Фрид, Борисочкина, 2019]. Степень влияния этих факторов на процессы накопления и миграции галогена зависит от конкретной геохимической обстановки.

Цель исследования: изучить закономерности распределения валового содержания фтора и его водорастворимой формы в почвенных катенах Кулундинской равнины и оценить почвы по содержанию фтора на предмет использования их в сельскохозяйственном производстве.

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Были проанализированы образцы почв двух катен, расположенных в бассейнах рек Бурла и Кулунда (рис. 1). Первая катена расположена в излучине р. Бурла. Она включала три позиции: в элювиальном ландшафте формируется каштановая осолодевшая среднemocная легкосуглинистая почва (Calcic Kastanozems, разрез 6), в супераквальном ландшафте – солонец светлый, засоленный, легкосуглинистый (Gleyic Solonetz Salic, разрез 4), в транссупераквальном – гумусово-квазиглеевая засоленная маломощная малогумусная легкосуглинистая почва (Chernic

Gleysols Salic, разрез 5). Длина катены составила 677 м.

Вторая катена, расположенная в долине р. Кулунды, состояла из чернозема квазиглееватого, маломощного, слабогумусированного, супесчаного (Gleyic Chernozems, разрез 7), сформировавшегося в элювиальном ландшафте, солонца светлого, засоленного, легкосуглинистого (Gleyic Solonetz Salic, разрез 8) – в супераквальной и гумусово-квазиглеевой засоленной маломощной слабогумусированной супесчаной почве (Chernic Gleysols Salic, разрез 9) в транссупераквальном ландшафте. Длина катены 1650 м.

Названия почв даны в соответствии с Классификацией и диагностикой почв России 2004 года с дополнениями [Полевой определитель почв, 2008] и Международной классификацией World Reference Base for Soil Resources [WRB, 2015].

В образцах почв, отобранных по генетическим горизонтам, определены содержание органического углерода по методу Тюрина, гранулометрический состав по методу Качинского с пробоподготовкой пиродиффлюометром натрия, pH – потенциометрическим методом. Валовое содержание фтора исследовали спектрофотометрическим методом с ализарин-комплексом без предварительной отгонки по методике, изложенной в работе [Головкова, Краснова, 1988]. Водорастворимую форму фтора определяли потенциометрическим методом с использованием фторидселективного электрода. Статистическая обработка полученных результатов проведена по [Доспехов, 1985].

## РЕЗУЛЬТАТЫ

**Валовое содержание фтора.** Валовое содержание фтора в почвах позволяет представить его накопление и распределение в почвенном профиле, а также миграцию в ландшафте. В элювиальных позициях изученных катен сформировались две зональные почвы: каштановая осолодевшая и чернозем квазиглееватый. В профиле каштановой почвы валовое содержание фтора колеблется от 97,85 до 134,40 мг/кг (рис. 2), что ниже, чем в ранее изученных аналогичных почвах юга Западной Сибири (200–260 мг/кг) [Конарбаева, 2008]. Данное обстоятельство может быть связано с более легким гранулометрическим составом кашта-

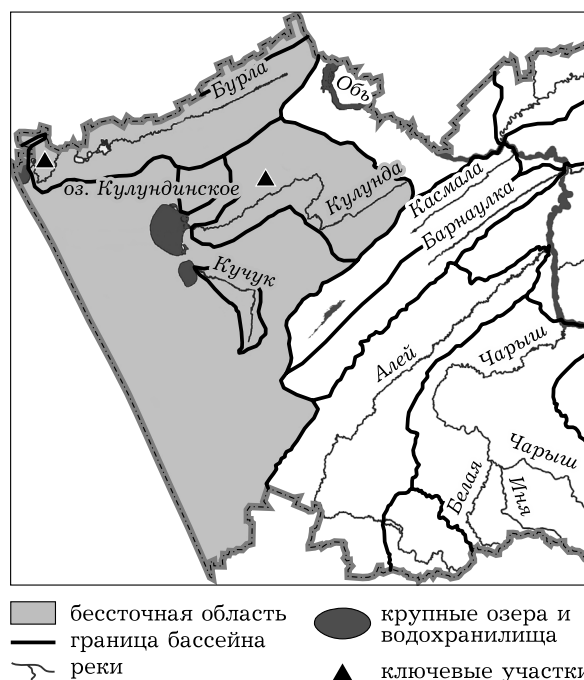


Рис. 1. Расположение ключевых участков

новой почвы. В черноземе квазиглееватом (рис. 3) зафиксировано самое низкое содержание галогена (в пределах 26,67–41,53 мг/кг). Это обусловлено супесчаным гранулометрическим составом этой почвы, в котором содержание ила достигает наименьших значений из всех исследованных почв (табл. 1). Согласно литературным данным, валовое содержание фтора в подобных почвах варьирует в диапазоне 68–120 мг/кг, однако такие цифры отмечены в среднесуглинистых почвах [Аникин, 2004].

В интразональных почвах содержание фтора намного выше, чем в зональных. Максимальное валовое содержание фтора обнаружено в солонцах на глубине солонцового горизонта (269,15 и 711,03 мг/кг в профиле солонцов долин рек Бурла и Кулунда соответственно). В данных почвах валовое содержание фтора высокое по всему профилю, а иллювиальный солонцовый и одновременно карбонатный горизонт послужил внутрипрофильным геохимическим барьером, где концентрация галогена максимальная. Гумусово-квазиглеевые засоленные почвы обеих катен по валовому содержанию фтора занимают промежуточное положение между солонцами и зональными почвами. В них содержание фтора максимально в поверхностных и

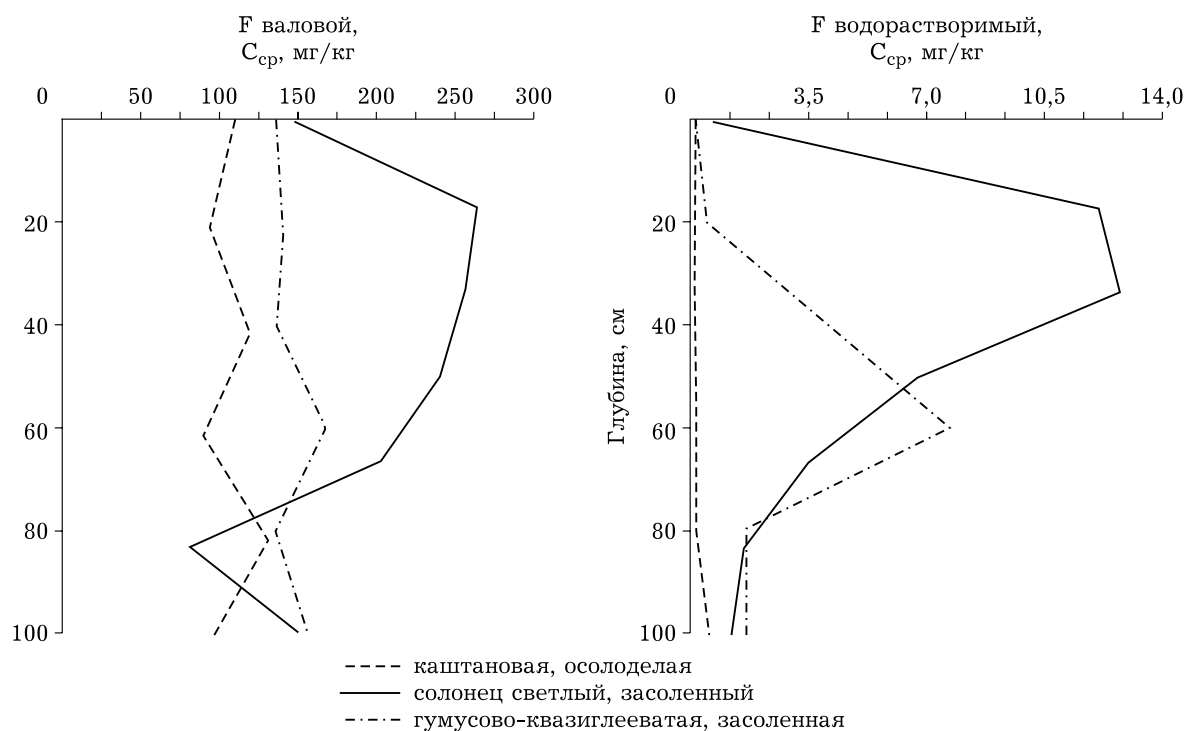


Рис. 2. Содержание валового и водорастворимого фтора в почвах долины р. Бурла

приповерхностных горизонтах, что обусловлено высокой концентрацией солей в этих горизонтах из-за выпотного водного режи-

ма. Засоленные почвы Кулундинской равнины приурочены, как правило, к пониженным элементам рельефа, в которых в течение дли-

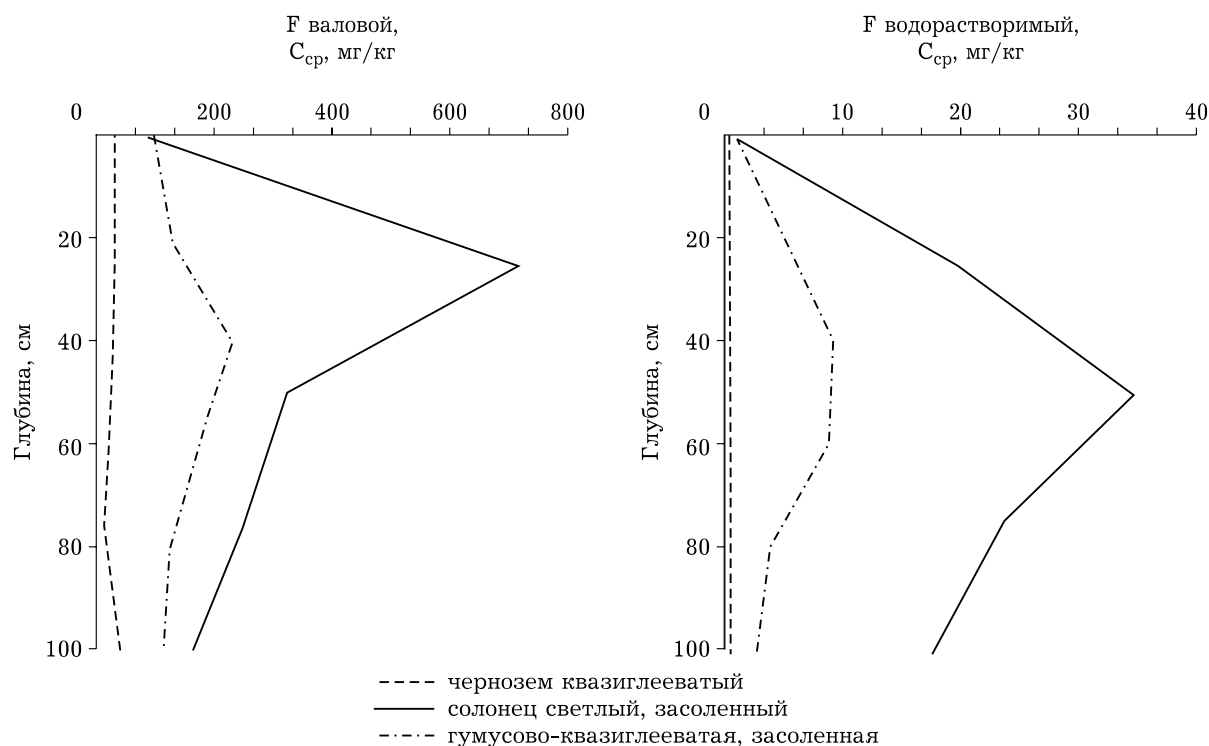


Рис. 3. Содержание валового и водорастворимого фтора в почвах долины р. Кулунда

Т а б л и ц а 1  
Характеристика почв долин рек Бурла и Кулунда

Горизонт	Глубина образца, см	С, %	pH	Гранулометрический состав		Сумма солей, %	На обменный, ммоль/100 г почвы
				Ил, %	Физическая глина, %		
Разрез 4. Солонец светлый, засоленный							
AJ	0–4	5,23	7,3	3,9	15,1	0,14	13,4
BSN	4–16	2,54	7,9	27,1	41,4	0,47	34,7
BSNs	23–33	0,99	8,7	28,4	40,9	0,90	36,4
BMKs	38–48	1,03	8,2	31,3	44,8	1,09	23,5
BCAs	50–60	Не опр.*	8,0	32,0	49,2	1,11	20,5
	75–85	»	8,1	15,2	21,4	0,79	17,8
Сса, q	103–113	»	8,2	19,4	28,8	0,78	16,8
Разрез 5. Гумусово-квизиглеевая засоленная							
AUao	0–7	4,30	7,5	8,8	25,0	1,02	8,4
AU	7–21	2,02	7,8	18,4	30,4	1,75	22,1
AUBca, s	22–32	1,09	8,4	19,7	29,6	1,19	24,0
Qca, s	50–60	Не опр.	8,3	24,0	35,4	1,00	21,0
CQca	80–90	»	7,9	18,3	26,0	1,01	20,6
C	100–110	»	7,7	18,9	27,3	0,92	16,6
Разрез 6. Каштановая осолоделая							
AJao	0–4	4,34	6,5	7,7	20,4	0,06	0,6
AJel	4–20	2,66	6,7	8,0	21,1	0,06	1,7
AJelB	22–32	1,69	6,5	16,8	25,7	0,06	1,3
BAJ	45–55	1,12	6,8	12,0	18,1	0,10	1,7
BMK	65–75	Не опр.	7,6	14,1	21,6	0,22	2,4
CAT	95–105	»	8,0	13,8	20,2	0,19	2,4
Разрез 7. Чернозем кваизиглееватый							
AU	0–20	2,49	6,3	4,7	11,6	0,04	0,9
	20–32	1,48	6,7	5,6	10,9	0,04	0,9
AUB	32–39	0,96	6,6	5,8	11,2	0,04	1,2
B	47–57	0,57	6,7	8,4	11,2	0,04	1,2
BCq	85–95	Не опр.	6,9	10,6	14,7	0,05	1,0
Разрез 8. Солонец светлый, засоленный							
AJ	0–11	4,42	6,7	4,3	16,0	0,09	3,0
BSN	11–24	2,88	8,3	29,2	44,2	0,25	11,5
BSNs	40–50	1,25	8,9	21,7	32,0	0,35	35,5
BCAs	65–75	Не опр.	8,9	26,6	36,4	0,39	35,3
Сса, q	88–98	»	8,7	23,0	34,5	0,36	35,4
Разрез 9. Гумусово-квизиглеевая засоленная							
AU	0–14	2,94	7,3	10,5	19,4	0,14	0,5
	14–17	1,53	7,7	9,8	10,6	1,16	2,2
	20–30	1,08	7,7	12,8	22,3	1,30	13,7
Bca, s	43–53	0,69	8,1	17,3	23,5	0,44	21,4
Qca, s	70–80	Не опр.	8,4	13,4	18,6	0,39	25,1
CQca	93–103	»	8,3	11,7	17,9	0,34	21,2

\*Не опр. – не определено.

тельного периода аккумулируются различные легкорастворимые соли, в том числе и соли фтора, например NaF и KF. Обилие образующихся солей может вызвать явление соосаждения, а с учетом присутствия солевого эффекта, даже в случае поступления фтора в составе труднорастворимых соединений, возможно их частичное растворение вследствие увеличения ионной силы почвенного раствора.

**Водорастворимая форма фтора.** Поступление галогена в пищевую цепочку определяется концентрацией его подвижных форм, особенно водорастворимой, обладающей наибольшей миграционной способностью и легкодоступностью для растений.

Опираясь на данные по водорастворимой форме фтора, можно более объективно оценить экологическую ситуацию в изучаемых почвах, так как именно данной формой фтора обеспечивается его поток в растения, а далее в организмы животных и человека.

В то же время стоит отметить, что в почве имеют место процессы, препятствующие полному усвоению растениями водорастворимого фтора. Это реакции образования труднорастворимых и комплексных соединений с участием фтора, защитные возможности самого растения и свойственная ему избирательность в поглощении различных химических элементов, что обеспечивает более интенсивное поглощение дефицитного элемента и замедление поглощения избыточных веществ.

Концентрация водорастворимого фтора в почвах оценивается согласно следующим критериям: предельно допустимая концентрация 10 мг/кг [СанПиН, 1988], допустимый уровень < 10 мг/кг, критический – 10–30 мг/кг, недопустимый – > 30 мг/кг, фон – 1,5 мг/кг [Танделов, 2004].

В исследованных зональных почвах – каштановой и черноземе квазиглееватом, содержание водорастворимой формы фтора колеблется соответственно в пределах от 0 до 0,41 и 0,08 до 0,30 мг/кг.

В интразональных почвах диапазон изменения водорастворимого фтора намного больше – от следов до 34 мг/кг.

## ОБСУЖДЕНИЕ

Механизмы поглощения фтора различными типами почв принципиально не различаются,

хотя акцент в связи с особенностью их генезиса и различием в физико-химических свойствах может быть несколько смещен в ту или другую сторону.

Проведенные исследования подтверждают, что процессы аккумуляции и миграции валового фтора в почве определяются в основном реакцией почвенной среды, гранулометрическим составом и водным режимом почв.

Слабая сорбирующая способность к фтору органического вещества и их низкая реакционная способность по отношению друг к другу не способствуют закреплению фтора в гумусовом слое, что должно приводить к его нисходящей миграции. Однако за счет обменных реакций с другими галоидопроизводными происходит его закрепление в гумусовой толще. Наблюдаемое увеличение концентрации фтора вниз по профилю почвы связано с его поглощением глинистыми минералами и полуторными оксидами минерального субстрата, а также осаждением на геохимических барьерах (прежде всего на кальциевом и магниевом), так как образующиеся  $\text{CaF}_2$  (константа растворимости равна  $4,0 \times 10^{-11}$ ) и  $\text{MgF}_2$  ( $6,5 \times 10^{-9}$ ) труднорастворимы.

Концентрация фтора в самых верхних гумусовых горизонтах несколько меньше, чем в нижележащих горизонтах по профилю почвы. Причиной отсутствия накопления элемента в гумусово-аккумулятивном горизонте является его нисходящая миграция ввиду слабой сорбирующей способности органического вещества к фтору, а также малочисленность возможных химических реакций между органическим веществом и галогеном [Конрабаева, 2004]. Прямое фторирование углеводородов – очень сильный экзотермический процесс, протекающий лишь в строго определенных условиях, поэтому вероятность взаимодействия органических компонентов гумуса непосредственно с фтором крайне ограничена. Если F поступает в виде HF, энергия диссоциации которой 135 ккал/моль, то разрыв его в почвенных условиях практически невозможен. Остается только взаимодействие с анионом  $\text{F}^-$ , легко образующимся из элементарного фтора, так как энергия диссоциации связи F–F всего 37 ккал/моль [Орлов, 1985]. Однако свободный фтор поступает в почву только в результате несанкционированных, аварийных выбросов промышленных предприятий,



приводящих к катастрофическим последствиям для окружающей среды.

Установлено, что фтору свойственна тенденция миграции из гумусовых горизонтов [Иванов, Кашин, 2003; Танделов, 2004]. Данная тенденция подтверждается и величиной коэффициента корреляции между гумусом и валовым содержанием фтора (табл. 2). Она максимальная в черноземе квазиглееватом (0,8), значительно ниже в каштановой почве, но тоже положительная (0,2), во всех остальных почвах – отрицательная. Более низкая концентрация фтора в гумусовых горизонтах свидетельствует об отсутствии его биогенного накопления в почвах, что подтверждается величиной коэффициента биологического поглощения (КБП), равного 0,097 [Добровольский, 1983].

Увеличение концентрации фтора вниз по профилю почв происходит за счет поглощения его глинистыми минералами и полуторными оксидами минерального субстрата, а также осаждением на геохимических барьерах [Конарбаева, 2004]. Отсутствие аккумуляции

фтора в органическом веществе почвы следует считать положительным явлением, так как препятствует загрязнению им верхних горизонтов почвы, а следовательно, и продукции растениеводства.

В черноземе квазиглееватом и каштановой почве валовое содержание галогена в верхних гумусированных горизонтах имеет низкие значения, вниз по профилю почвы оно еще снижается и только ближе к почвообразующей породе несколько увеличивается. Максимумы валового содержания фтора в катенах отмечены в солонцах (269,15 и 711,03 мг/кг в долинах рек Бурла и Кулунда соответственно), в гумусово-квазиглеевых почвах валовое содержание фтора ниже, чем в солонцах, при этом внутрипрофильные максимумы зафиксированы в горизонтах карбонатной аккумуляции на глубине 20–30 и 50–60 см (226,45 и 166,38 мг/кг соответственно).

Заметную роль в аккумуляции фтора играет гранулометрический состав почв, особенно фракции физической глины (<0,01 мм) и ила (<0,001 мм) [Omueti, Jones, 1980; Фрид,

Т а б л и ц а 2

Коэффициенты корреляции Пирсона между компонентами почвы и содержанием фтора

Показатель	Разрез, название почвы	Коэффициент корреляции	
		Валовой фтор	Водорастворимый фтор
Ил (<0,001 мм)	Р. 4. Солонец светлый, засоленный	0,7	0,6
	Р. 5. Гумусово-квазиглеевая, засоленная	0,6	0,8
	Р. 6. Каштановая, осолодевшая	0,4	0,3
	Р. 7. Чернозем квазиглееватый	0,1	0,8
	Р. 8. Солонец светлый, засоленный	0,7	0,7
	Р. 9. Гумусово-квазиглеевая, засоленная	0,5	0,6
Глина (<0,01 мм)	Р. 4. Солонец светлый, засоленный	0,8	0,6
	Р. 5. Гумусово-квазиглеевая, засоленная	0,7	0,8
	Р. 6. Каштановая, осолодевшая	0,6	–0,3
	Р. 7. Чернозем квазиглееватый	0,7	0,6
	Р. 8. Солонец светлый, засоленный	0,8	0,6
	Р. 9. Гумусово-квазиглеевая, засоленная	0,5	0,4
Гумус	Р. 4. Солонец светлый, засоленный	–0,9	–0,7
	Р. 5. Гумусово-квазиглеевая, засоленная	–0,3	–0,8
	Р. 6. Каштановая, осолодевшая	0,2	0,1
	Р. 7. Чернозем квазиглееватый	0,8	–0,4
	Р. 8. Солонец светлый, засоленный	–0,4	–1,0
	Р. 9. Гумусово-квазиглеевая, засоленная	–0,8	–1,0

П р и м е ч а н и е. Уровень значимости 0,05.

Борисочкина, 2019]. Величина коэффициента корреляции ( $r$ ) между илом и валовым содержанием фтора (см. табл. 2) в солонцах 0,7, в гумусово-квизиглеевых засоленных – 0,5–0,6, самая низкая в зональных почвах. Величина  $r$  между валовым содержанием фтора и глинистой фракцией распределена следующим образом: солонец светлый > гумусово-квизиглеевая > чернозем квизиглееватый и каштановая.

Содержание водорастворимого фтора в изученных почвах варьирует в следующем диапазоне: в каштановой осолоделой почве – от 0 до 0,41 мг/кг, в черноземе квизиглееватом – от 0,08 до 0,30 мг/кг. В интразональных почвах содержание водорастворимого галогена в солонцах от 0,55 до 12,76 мг/кг в разрезе 4 и от 0,92 до 34,65 мг/кг в разрезе 8; в гумусово-квизиглеевых почвах – от 0 до 7,43 мг/кг (разрез 5) и от 1,03 до 9,07 мг/кг (разрез 9).

Содержание водорастворимого фтора в почвах понижений наиболее высокое, что обусловлено их геохимической позицией, повышенным валовым содержанием галогена и значительным уровнем засоления почв.

Поглощение фтора почвами может иметь адсорбционный и химический характер в зависимости от состава и свойств почв. Высокие значения pH, преобладание глинистых минералов, полуторных оксидов и гидроксидов оказывают существенное влияние на поглощение фтора почвой.

С наибольшей вероятностью осуществим обмен гидроксильных ионов на анион фтора ввиду сходства их ионных радиусов, равных 1,33 Å. Помимо участия в обменных реакциях вероятно внедрение фторид-аниона в межпакетное пространство глинистых минералов, способных к набуханию, обилием которых отличаются солонцовые почвы. Согласно Д. С. Орлову [1985], межпакетное пространство монтмориллонита при набухании составляет от 12,4 до 14,0 Å, поэтому внедрение фторид-аниона с ионным радиусом 1,33 Å в такое пространство вполне возможно, даже с учетом того, что F<sup>-</sup> всегда сольватирован четырьмя молекулами воды в растворах [Кларксон, 1978].

Таким образом, существует несколько механизмов поглощения фтора почвами, при этом более прочно фторид-анион связывает-

ся в случае внедрения в состав минералов или образования комплексных анионов, теряя способность к миграции, что весьма важно с экологической точки зрения.

В изученных почвах валовое содержание фтора варьировало в диапазоне от 13,9 мг/кг в зональных почвах элювиальных позиций до 711,03 мг/кг в солонцах, сформировавшихся в супераквальных ландшафтах. Водорастворимая форма фтора находилась в пределах от 0 до 34,65 мг/кг соответственно. Выявленные в солонцах максимальные валовое содержание фтора и концентрация его водорастворимой формы соответствуют экологически критическим и недопустимым концентрациям, поэтому использование данных почв в сельскохозяйственном производстве сопряжено с риском для здоровья животных и человека.

В целом стоит отметить, что в зональных почвах катен валовое содержание фтора и концентрация его водорастворимой формы находились в пределах значительно ниже допустимого уровня, т.е. до 500 и до 10 мг/кг соответственно. В интразональных почвах иная ситуация. Если в гумусово-квизиглеевых почвах концентрация водорастворимого фтора в пределах допустимого уровня (0,36–9,07 мг/кг), то в солонцах достигала недопустимо высоких значений – более 30 мг/кг (0,55–34,65 мг/кг). Валовое содержание фтора в профилях солонцов также критическое – до 711,03 мг/кг. Повышенное валовое содержание фтора и его водорастворимой формы в солонцах засоленных и гумусово-квизиглеевых засоленных почвах в сравнении с зональными объясняется положением этих почв в ландшафте, наличием в их профиле солонцового и карбонатного горизонтов, которые играют роль геохимических барьеров, выраженной щелочной реакцией и значительной концентрацией натрия, образующего хорошо растворимый NaF [Shhabra et al., 1980].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в зональных почвах изученных катен Кулундинской равнины содержание валового фтора варьирует в пределах 30–130 мг/кг, а доминирует он в интразональных почвах, достигая более 300 мг/кг. Выявлено, что в засоленных солонцах, развивающихся в супераквальных ландшафтах,



валовое содержание фтора и его водорастворимой формы имеет соответственно экологически критические и недопустимые концентрации, поэтому существует риск накопления избыточных концентраций фтора в сельскохозяйственной продукции. Распределение фтора в почвах катены наглядно свидетельствует об изменении его аккумуляции в различных элементарных ландшафтах.

#### Благодарности

Авторы выражают благодарность ведущим инженерам лабораторий биогеохимии и географии и генезиса почв Демину Вячеславу Владимировичу и Писаревой Ольге Николаевне за качественное выполнение аналитических работ.

#### Вклад авторов

Полевые почвенные исследования проведены Б. А. Смоленцевым, Н. В. Елизаровым и В. В. Поповым. Сбором информации по литературным источникам, обработкой полевых и аналитических данных, а также подготовкой статьи к публикации занимались все авторы.

#### Финансирование

Полевые работы и определение свойств почв выполнены при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 21-55-75002); лабораторные анализы, в том числе по определению фтора, а также подготовка статьи к публикации – по государственному заданию Института почвоведения и агрохимии Сибирского отделения Российской академии наук.

#### Соблюдение этических стандартов

В данной работе отсутствуют исследования человека или животных.

#### Конфликт интересов

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Авцын А. П., Жаворонков А. А., Риш М. А., Строчкова Л. С. Микроэлементозы человека. М.: Медицина, 1991. 495 с.
- Аникин В. В. Содержание и распределение фтора в природных и антропогенных ландшафтах и зонах загрязнения урбанизированных территорий Мордовии: автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Ярославль, 2004. 26 с.
- Баранова А. А., Шкуратова И. А. Биологическая роль фтора и влияние его повышенного содержания на организм животных и человека // Сб. материалов конф. "Вклад молодых ученых в инновационное развитие АПК России". Екатеринбург: Уральское изд-во, 2012. С. 101–107.
- Гапонюк Э. И., Кузнецова М. В. Влияние фтористого натрия на свойства почвы и развитие некоторых сельскохозяйственных культур // Гигиена и санитария. 1984. № 6. С. 77–79.
- Головкова Т. В., Краснова Н. М. Определение валового фтора в почве с помощью ионселективного электрода // Бюл. Почв. ин-та им. Докучаева. М., 1988. № 42. С. 19–22.
- Горностаева Е. А., Фукс С. Л. Влияние фторсодержащих соединений на живые организмы (обзор) // Теорет. и прикл. экология. 2017. № 1. С. 14–24. doi: 10.25750/1995-4301-2017-1-014-024
- Добровольский В. В. География микроэлементов. Глобальное рассеяние. М.: Мысль, 1983. 272 с.
- Доспехов Б. А. Методика полевого опыта. М.: Агропромиздат, 1985. 351 с.
- Евдокимова Г. А., Мозгова Н. П. Оценка загрязнения почв и растений в зоне воздействия газозаводных выбросов алюминиевого завода // Теорет. и прикл. экология. 2015. № 4. С. 64–68. doi: 10.25750/1995-4301-2015-4-064-068
- Иванов Г. М., Кашин В. К. Фтор в почвах Забайкалья // Почвоведение. 2003. № 2. С. 158–163 [Ivanov G. M., Kashin V. K. Fluorine contents in soils of the Transbaikalian region // Eur. Soil Sci. 2003. N 2. P. 149–154].
- Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях. М.: Мир, 1989. 438 с.
- Кларксон Д. Транспорт ионов и структура растительной клетки. М.: Мир, 1978. 365 с.
- Конарбаева Г. А. Галогены в почвах юга Западной Сибири. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2004. 200 с.
- Конарбаева Г. А. Галогены в природных объектах юга Западной Сибири: автореф. дис. ... д-ра биол. наук. Новосибирск, 2008. 33 с.
- Орлов Д. С. Химия почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1985. 360 с.
- Полевой определитель почв. М.: Почв. ин-т им. В. В. Докучаева, 2008. 182 с.
- Савенко В. С. Почвы как возможный источник фтора в атмосферу // Геохимия. 2018. № 9. С. 920–922. doi: 10.1134/S0016752518090091 [Savenko V. S. Soils as a possible source of fluorine in the atmosphere // Geochemistry International. 2018. N 9. P. 961–962].
- СанПин 42-126-4433-87. Санитарные нормы допустимых концентраций токсичных веществ в почве. М.: Минздрав СССР, 1988. 53 с.
- Танделов Ю. П. Фтор в системе "почва – растение". М.: Россельхозакадемия, 2004. 106 с.
- Фрид А. С., Борисочкина Т. И. Фтор: миграционная подвижность в почвах при техногенных загрязнениях // Агрохимия. 2019. № 3. С. 65–71. doi: 10.1134/S0002188119030062
- Шелепова О. В., Потатуева Ю. А. Агроэкологическое значение фтора // Агрохимия. 2003. № 9. С. 78–87.
- Choubisa S. L. Endemic hydrofluorosis in cattle (*Bos taurus*) in India: an epitomised review // J. Veterinary Sci. Technol. 2023. Vol. 8, N 1. P. 001–007.
- Cronin S. J., Manoharan V., Hedley M. J., Loganathan P. Fluoride: review of its fate, bioavailability and risks of fluorosis in grazed-Pasture systems in New Zealand // New Zealand J. Agric. Res. 2000. Vol. 43. P. 295–321. doi: 10.1080/00288233.2000.9513430

- Cui Sf., Yang Jy. Effects of Fluorine on the Growth of Broad Bean (*Vicia faba* L.) and Maize (*Zea mays* L.) and the Response of Microbial Community in Soils // Water, Air and Soil Pollut. 2021. Vol. 232, N 1. P. 1–14. doi: 10.1007/s11270-021-04983-x
- Habiyakare T., Schurer J. M., Poole B., Murcott S., Migabo B., Mardochee B., Amuguni J. H., Morgan J. P. Dental fluorosis among people and livestock living on Gihaya Island in Lake Kivu, Rwanda // One Health Outlook. 2021. Vol. 3 (1). P. 23. doi: 10.1186/s42522-021-00054-7
- Huang C., Zhang H., Zeng W., Ma S., Zhao S., Jiang Y., Huang C., Mao H. Enhanced fluoride adsorption of aluminum humate and its resistance of fluoride accumulation in tea leaves // Environmental Technol. 2020. Vol. 41, N 3. P. 329–338. doi: 10.1080/09593330.2018.1498135
- IUSS Working Group WRB. 2014. World Reference Base for Soil Resources 2014. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports N 106. FAO, 2015. 192 p.
- Jezierska-Madziar M., Pinskiar P. Fluoride in common Reeds (*Phragmites Australis*) sampled from Old Warta Reservoirs near Lubon and Radzewice, Poland // Fluoride Res. Report. 2003. Vol. 36 (1). P. 21–24.
- Loganathan P., Hedley M. J., Wallace G. C., Roberts A. H. C. Fluoride accumulation in pasture forages and soils following long-term applications of phosphorus fertilizers // Environ. Pollut. 2001. Vol. 115. P. 275–282.
- Omuetti J. A. I., Jones R. L. Fluorine distribution with depth in relation to profile development in Illinois // Soil Sci. Soc. Amer. J. 1980. Vol. 44, N 2. P. 247–249.
- Redkina V. V., Shalygina R. R., Korneykova M. V. Microfungi, algae and cyanobacteria in soils polluted with fluorine (Kola Peninsula, Russia) // Czech Polar Reports. 2020. Vol. 10, N 1. P. 94–109. doi: 10.5817/CPR2020-1-9
- Sariñana-Ruiz Y. A., Escobedo-Bretado M. A., Ponce-Peña P., Ramírez-Aldaba H., Lara R. H., Vazquez-Arenas J., Sosa-Rodríguez F. S., Labastida I., Armienta M. A., Aragón-Piña A., González-Valdez L. S. Assessment of arsenic and fluorine in surface soil to determine environmental and health risk factors in the Comarca Lagunera, Mexico // Chemosphere. 2017. Vol. 178. P. 391–401. doi: 10.1016/j.chemosphere.2017.03.032
- Shhabra R., Singh A., Abrol I. Fluorine in sodic soils // Soil Sci. Soc. Amer. J. 1980. Vol. 44, N 1. P. 33–36.

## Content and distribution of fluorine in soil catenas of the Kulunda Plain

B. A. SMOLENTSEV, G. A. KONARBAEVA, N. V. ELIZAROV, V. V. POPOV

*Institute of Soil Science and Agrochemistry of SB RAS  
8/2, Akademik Lavrentiev ave., Novosibirsk, 630090, Russia  
E-mail: smolentsev.b@issa-siberia.ru*

The content and distribution of fluorine in two soil catenas located in the basins of the Burla and Kulunda rivers on the territory of the Kulunda Plain was studied. The use of the catenas method made it possible to compare the content of fluorine in soils of different geochemical relief positions, in zonal and intrazonal soils. It is not just the presence of fluorine in soils that matters, but its concentration, which underlies the dual nature of his biological role – positive or negative, which requires the introduction of sanitary and hygienic standards for his content. In the studied soils, the total content of fluorine varies from 13.9 to 711.03 mg/kg, the water-soluble form varies from 0 to 34.65 mg/kg. It was found that in saline solonchaks developing in supraquatic landscapes, the content of total and water-soluble fluorine have, respectively, ecologically critical and unacceptable concentrations, therefore, the use of these soils in agricultural production is associated with the risk of accumulation of excess amounts of fluorine in the body of animals and humans.

**Key words:** soil catena, solonchaks, Kulunda Plain, total fluorine, water-soluble fluorine.