

Распределение фтора в поверхностных водах бассейна Верхнего Дона в меженный период

А. В. Савенко[✉], В. С. Савенко, Д. И. Школьный

Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова,
Российская Федерация
(119991, г. Москва, Ленинские горы, 1)

Аннотация. Цель – установление уровня содержания фтора в поверхностных водах бассейна Верхнего Дона и его соответствия санитарно-гигиеническим требованиям.

Материалы и методы. В период зимней межени 2019 г. в бассейне Верхнего Дона были отобраны 30 проб воды из рек и водохранилищ, в которых определяли содержание фтора, величину pH, минерализацию и концентрации компонентов основного солевого состава. Использованы следующие аналитические методы: потенциометрия (фтор и pH), объемный анализ (щелочность \approx HCO_3^-) и капиллярный электрофорез (остальные компоненты основного солевого состава).

Результаты и обсуждение. Среднее содержание фтора в поверхностных водах бассейна Верхнего Дона в меженный период составляет 0,33 мг/л при диапазоне значений 0,18-0,53 мг/л, что близко соответствует более ранним данным для речных вод Воронежской области: 0,26 (0,10-0,45) мг/л. Обнаружена тесная корреляция концентрации фтора с величиной pH ($r = 0,84$) при отсутствии значимых взаимосвязей с минерализацией и концентрациями главных ионов. Основным фактором, приводящим к возрастанию концентрации фтора при увеличении pH, служит вытеснение ионами OH^- присутствующего в минеральных фазах структурного и сорбированного фтора.

Выводы. В связи с существенно более низким уровнем содержания фтора в поверхностных водах бассейна Верхнего Дона по сравнению с физиологическим оптимумом для человека (0,7-1,5 мг/л) рекомендуется провести детальное изучение распределения фтора в грунтовых и подземных водах региона и оценку перспектив их использования для питьевого водоснабжения.

Ключевые слова: бассейн Верхнего Дона, зимний речной сток, фтор, химический состав.

Источник финансирования: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-17-00088, <https://rscf.ru/project/24-17-00088/>.

Для цитирования: Савенко А. В., Савенко В. С., Школьный Д. И. Распределение фтора в поверхностных водах бассейна Верхнего Дона в меженный период // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология, 2025, № 3, с. 169-175. DOI: <https://doi.org/10.17308/geo/1609-0683/2025/3/169-175>

ВВЕДЕНИЕ

Фтор, являясь биологически активным элементом, способен разнонаправленно – благоприятно или негативно – влиять на развитие живых организмов [1, 5, 11, 12]. В организме человека основное количество фтора поступает с питьевой водой, для которой установлен оптимальный для поддержания его здоровья диапазон концентраций фтора от 0,7 до 1,5 мг/л [18]. Более низкие и более высокие по сравнению с физиологическим оптимумом концентрации фтора в потребляемой человеком воде вызывают нарушения в функционировании клеток костной ткани, пищеварительной, кровеносной, сердечнососудистой и нервной систем [3, 6, 10, 12, 19, 20]. Костная ткань при этом играет роль регулятора содержания фторидов в плазме крови и других органах.

С точки зрения контроля качества воды, важно знать содержание фтора в водных объектах, используемых для питьевого водоснабжения. Преимущество имеют

исследования, проводимые на бассейновом уровне, что значительно облегчает практическое применение полученных результатов при создании единых региональных систем водоснабжения или искусственных геохимических барьеров, предназначенных для регулирования содержания фтора в водных объектах суши [15]. Цель настоящей статьи состояла в определении пространственной изменчивости содержания фтора в поверхностных водах бассейна Верхнего Дона и его соответствия санитарно-гигиеническим требованиям.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Бассейн Верхнего Дона расположен в пределах двух геологических структур: Воронежской антеклизы Среднерусской возвышенности в западной части и Окско-Донской низменной равнины на левобережье. Кристаллический фундамент покрыт отложениями мезозойского и кайнозойского возрастов, в основном неогеновыми и меловыми песками, глинами и галечниками.

По глубоким долинам рек обнажаются отложения девонского возраста (известняки, песчаники, аргиллиты), водораздельные поверхности перекрыты четвертичными отложениями (песками, суглинками и глинами). Встречаются карстовые образования. Почвенный покров характерный для лесостепной зоны недостаточно увлажнения с преобладанием оподзоленных, выщелоченных и типичных черноземов. Помимо природных условий, значительное влияние на химический состав поверхностных вод бассейна Верхнего Дона оказывает интенсивно ведущаяся хозяйственная деятельность.

В ходе экспедиции НСО кафедры гидрологии суши Географического факультета МГУ (руководитель Д.И. Школьный) с 29 января по 2 февраля 2019 г. были проведены гидролого-гидрохимические исследования меженного состояния водных объектов территории (рис. 1): водотоков разной крупности и двух водохранилищ – Воронежского и Матырского. Воронежское водохранилище расположено в пределах г. Воронеж на одноименной реке и имеет многоцелевое назначение. Матырское водохранилище создано на реке Матыре (левый приток реки Воронеж) в 3,5 км выше г. Липецка для водообеспечения Новолипецкого металлургического комбината и других городских промышленных предприятий. Также его воды используются при ороше-

нии сельскохозяйственных угодий и для нужд рыбного хозяйства. Наиболее крупные из обследованных рек – Дон, Воронеж, Сосна, Красивая Мечка и Матыра; остальные водотоки относятся к малым рекам и ручьям. Фаза зимней межени в регионе характеризуется пониженным уровнем воды в реках и преимущественно подземным питанием. Согласно данным гидрологической съемки, водность рек в период проведения полевых работ была близка к среднемноголетней для зимнего периода.

Модули стока воды с изученной территории вычисляли по измеренным перед гидрохимическими работами расходам воды водотоков и площадям локальных водосборов. Величину pH определяли *in situ* портативным потенциометром, после чего отбирали пробы воды и отфильтровывали их через мембранный фильтр с диаметром пор 0,45 мкм в полипропиленовые фланконы. В лабораторных условиях в фильтрате измеряли содержание фтора методом прямой потенциометрии с фторидным ионоселективным электродом «Элит-221» и хлорсеребряным электродом сравнения в присутствии ацетатного солевого буфера [13], а также концентрации компонентов основного солевого состава: Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Cl^- и SO_4^{2-} методом капиллярного электрофореза [7, 8] и величину общей щелочности $\text{Alk} \approx \text{HCO}_3^-$ объемным ацидиметрическим методом [9].

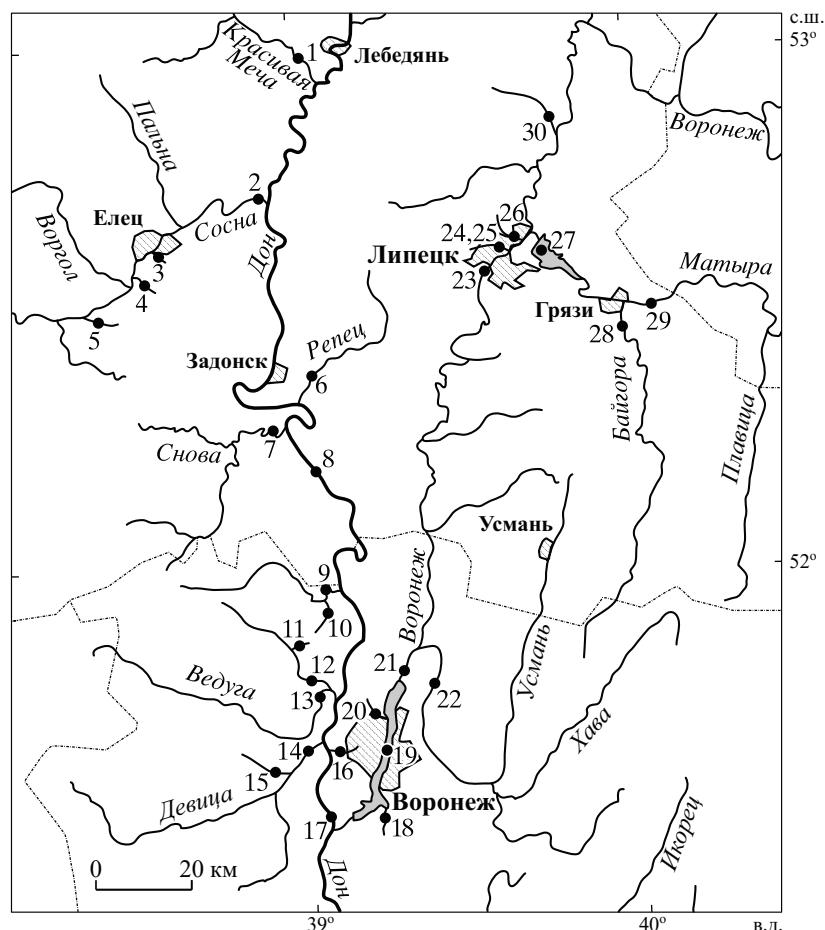


Рис. 1. Расположение точек отбора проб поверхностных вод в бассейне Верхнего Дона
[Fig. 1. Location of surface water sampling points in the Upper Don basin]

Распределение фтора в поверхностных водах бассейна Верхнего Дона в меженый период

Данные о содержании фтора в поверхностных водах (реках и водохранилищах) бассейна Верхнего Дона в период зимней межени 2019 г. приведены в таблице.

Средняя концентрация фтора в изученных 30 пробах поверхностных вод составляет 0,33 мг/л при диапазоне 0,18-0,53 мг/л. Полученные значения близки к более ранним определениям фтора в речных водах Воронежской области, находящимся в интервале 0,10-0,45 мг/л при средней величине 0,26 мг/л [2]. Это

существенно меньше нижнего предела санитарно-гигиенического оптимума, равного 0,7 мг/л, и свидетельствует о повышенном риске развития на обследованной территории группы заболеваний под названием гипофтороз, в частности кариеса. Для улучшения ситуации рекомендуется провести детальное изучение распределения фтора в грунтовых и подземных водах региона и рассмотреть возможность их использования в питьевых целях.

Таблица

Содержание фтора в поверхностных водах бассейна Верхнего Дона в период зимней межени 2019 г.
и их гидролого-гидрохимическая характеристика

[Table. Fluorine content in surface waters of the Upper Don basin during the winter low-water period of 2019 and their hydrological and hydrochemical characteristics]

№ точки / Point No.	Водный объект / Water object	Модуль стока, л/с км ² / Runoff rate, L/s km ²	рН	Минерализация, мг/л / Mineralization, mg/L	Концентрации растворенных компонентов, мг/л / Concentrations of dissolved components, mg/L							
					F ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
1	Р. Красивая Мечка	3,02	7,25	614	0,26	25,8	121	311	70,8	2,90	25,8	56,8
2	Р. Сосна	2,14	7,30	557	0,27	29,0	71,8	313	45,4	2,22	35,1	60,2
3	Руч. Казинка	1,07	7,12	633	0,18	43,3	48,6	383	21,0	7,62	46,7	83,1
4	Р. Воронец	1,38	7,20	485	0,22	14,7	28,5	324	16,6	2,74	29,2	69,1
5	Р. Паниковец	0,26	7,35	438	0,26	8,8	28,1	299	13,4	1,68	26,4	60,9
6	Р. Репец	0,57	7,45	419	0,33	14,9	63,4	235	10,1	1,93	26,7	67,5
7	Р. Снова	1,08	7,63	489	0,34	17,7	46,1	310	25,1	1,56	29,2	59,6
8	Р. Дон, с. Хлевное	2,29	7,54	502	0,31	24,4	65,3	290	17,4	2,55	35,5	66,6
9	Р. Большая Верейка	0,80	7,48	650	0,37	18,4	60,7	418	57,4	2,99	40,8	52,3
10	Р. Каверье	2,24	7,45	629	0,35	20,8	79,3	376	54,5	1,42	42,9	54,0
11	Левый приток р. Трещевки	0,13	7,67	570	0,43	4,7	9,1	425	43,9	2,40	23,7	61,4
12	Р. Трещевка	3,35	7,52	645	0,38	21,7	58,6	420	45,7	2,84	41,5	54,3
13	Р. Ведуга	1,45	7,34	587	0,32	22,2	68,1	354	55,8	2,78	32,6	51,5
14	Р. Девица	2,33	7,38	730	0,30	41,6	187	315	94,4	3,46	35,6	52,7
15	Р. Гнилуша	0,86	7,30	1502	0,30	261	341	506	180	4,95	113	96,1
16	Р. Песчаный лог	0,53	7,85	1134	0,48	301	82,0	408	117	10,4	49,4	166
17	Р. Дон, выше впадения р. Воронеж	2,36	7,45	568	0,30	34,0	77,6	319	30,3	3,21	39,3	64,8
18	Р. Тавровка	0,10	7,05	749	0,27	13,0	309	233	80,6	2,55	38,4	72,2
19	Воронежское вдхр.	—	7,70	713	0,32	32,4	158	343	70,7	4,17	41,2	63,6
20	Р. Коровий лог	0,15	7,13	901	0,29	167	213	278	73,1	1,58	62,3	106
21	Р. Воронеж, выше Воронежского вдхр.	2,36	7,38	559	0,36	19,7	62,8	342	49,1	2,62	29,3	53,7
22	Р. Усмань	0,75	7,25	860	0,31	53,8	220	368	98,2	4,90	53,7	61,1
23	Р. Воронеж, ниже г. Липецка	1,75	7,40	656	0,35	35,6	110	354	49,5	4,79	38,7	63,0
24	Р. Липовка, устье	0,26	7,98	1937	0,53	561	285	445	514	3,17	41,9	87,3
25	Р. Липовка, среднее течение	0,16	7,40	1248	0,40	150	455	336	52,9	1,69	122	131
26	Р. Студеновка	0,94	7,28	535	0,24	71,7	103	217	29,7	3,99	35,1	74,1
27	Матырское вдхр.	—	8,08	667	0,47	32,0	108	363	59,2	5,08	35,1	65,2
28	Р. Байгора	1,69	7,37	675	0,34	21,5	161	327	65,5	1,82	36,8	61,0
29	Р. Матыра	1,88	7,27	646	0,34	27,2	150	312	62,1	1,76	35,2	57,5
30	Р. Мартынчик	2,72	7,49	606	0,35	20,4	73,5	359	51,1	1,01	41,5	59,2
Статистические показатели												
Среднее арифметическое		1,38	7,44	730	0,33	70,3	128	343	71,8	3,2	42,8	71,1
Минимальные значения		0,10	7,05	419	0,18	4,7	9,1	217	10,1	1,0	23,7	51,5
Максимальные значения		3,35	8,08	1937	0,53	561	455	506	514	10,4	122	166
Коэффициенты корреляции с фтором		0,84	0,50	—	0,52	0,15	0,48	0,54	0,12	0,08	0,29	

Между содержанием фтора, с одной стороны, а также величиной минерализации и концентрациями компонентов основного солевого состава, с другой, значимые корреляционные связи не прослеживаются (см. табл.). В [2] также указывалось на отсутствие значимой корреляции содержания фтора с минерализацией в поверхностных водах Воронежской области. Вместе с тем следует отметить существование общей тенденции увеличения концентрации фтора с ростом минерализации [4], которая не всегда, а только в отдельных случаях реализуется в форме тесных взаимосвязей [17]. С. А. Брусиловский и В. И. Дворов [4] на примере рек гумидной и semi-аридной-аридной зон бывшего СССР, а также рек южных штатов США показали сложный характер функциональной зависимости концентрации фтора от минерализации. При низкой минерализации эта зависимость имеет приближенно линейный вид, но при увеличении минерализации происходит постепенное снижение углового коэффициента и выход на плато. Дальнейшее увеличение минерализации до некоторого «критического» значения приводит к началу нового линейного возрастания

концентрации фтора, а затем к повторному снижению углового коэффициента зависимости и выходу на новое плато с более высокой концентрацией фтора. Параметры линейных участков и «критических» значений минерализации для разных выборок различаются. Таким образом, тесные корреляционные связи могут обнаруживаться только на линейных участках зависимости концентрации фтора от минерализации и должны отсутствовать в областях снижения углового коэффициента и приближения к плато. В зависимости от того, в какую область попадает диапазон минерализации изучаемых водных объектов, различается значимость ее корреляции с концентрацией фтора.

Единственным компонентом, с которым тесно коррелирует фтор в поверхностных водах бассейна Верхнего Дона, является ион водорода, или величина pH (рис. 2):

$$[F^-] \text{, мг/л} = 0,268 \text{ pH} - 1,66, r = 0,84.$$

Положительная корреляция содержания фтора с величиной pH не только в поверхностных, но также в подземных и термальных водах отмечалась во многих работах, в том числе в наших исследованиях.

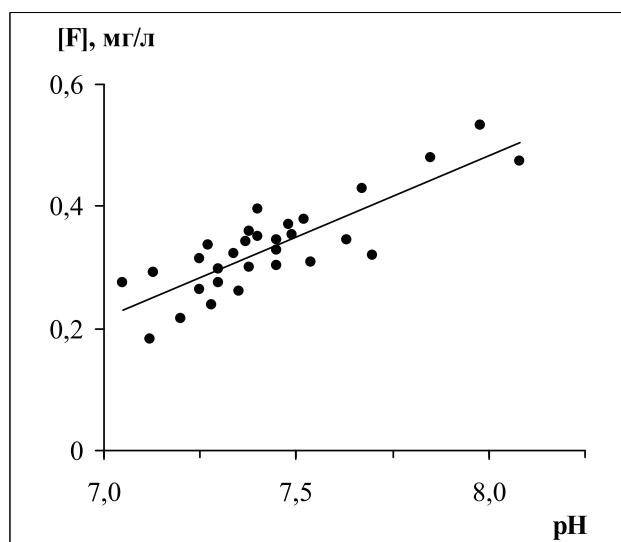
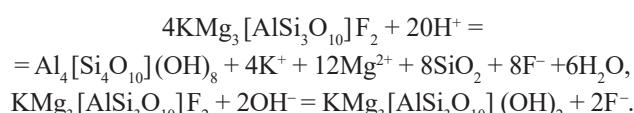


Рис. 2. Зависимость содержания фтора в поверхностных водах бассейна Верхнего Дона от величины pH
[Fig. 2. Dependence of fluorine content in surface waters of the Upper Don basin on the pH value]

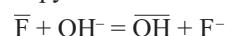
Вывод об определяющем влиянии кислотности водной среды на интенсивность мобилизации фтора подтверждён экспериментально [14, 16]. Мобилизация фтора из магматических пород минимальна в нейтральной среде и увеличивается как в кислой, так и в щелочной областях в результате растворения–разложения минералов и замещения фтора в кристаллической решётке на ионы OH^- раствора соответственно. Указанные процессы иллюстрируются реакциями взаимодействия слюды (фторфлогопита) с ионами H^+ и OH^- :



Первая из приведенных реакций играет заметную роль при $\text{pH} < 4,0-4,5$, что в водных объектах встречается

крайне редко. Этим объясняется общая тенденция возрастания концентрации фтора в природных водах при увеличении pH.

Другим процессом, вызывающим повышение концентрации фтора при подщелачивании водной среды, является его сорбционно-десорбционное взаимодействие с природными минералами. Поскольку ионы OH^- обладают наибольшей сорбционной активностью среди распространенных в природе анионов, количество фтора, сорбированного на минералах в зоне гипергенеза, контролируется обменной реакцией:



где чертой сверху обозначена поверхность твердой фазы. Очевидно, что с ростом pH (увеличением концентрации ионов OH^-) количество сорбированного

фтора должно уменьшаться за счет его перехода в растворенное состояние.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенного исследования позволяют сделать следующие выводы.

1. Содержание фтора в поверхностных водах бассейна Верхнего Дона (0,18-0,53 мг/л при среднем значении 0,33 мг/л) существенно меньше нижнего предела санитарно-гигиенического оптимума, равного 0,7 мг/л, что создает на обследованной территории повышенный риск заболевания кариесом. В связи с этим рекомендуется изучить распределение фтора в грунтовых и подземных водах региона с целью оценки перспектив их использования для питьевого водоснабжения.

2. Наличие тесной положительной корреляции между концентрацией фтора и величиной pH обусловлено вытеснением ионами OH⁻ фтора, присутствующего в структуре минеральных фаз и находящегося в сорбированном состоянии на их поверхности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агалакова Н. И., Гусев Г. П. Влияние неорганических соединений фтора на живые организмы различного филогенетического уровня // Журнал эволюционной биохимии и физиологии, 2011, т. 47, № 5, с. 337-347.

2. Баркалова Н. Г., Жагтар К. Б. Некоторые результаты определения содержания фтора, брома и йода в речных водах Воронежской области // Гидрохимические материалы, 1977, т. 69, с. 3-7.

3. Белякова Т. М., Жаворонков А. А. Изучение эндемического флюороза на континентах земного шара // Труды Биогеохимической лаборатории АН СССР, 1978, т. 9, с. 37-53.

4. Брусиловский С. А., Дворов В. И. Некоторые черты гидрохимии фтора в термальных и других типах природных вод // Региональная геотермия и распространность термальных вод в СССР. Москва: Наука, 1967, с. 298-308.

5. Габович Р. Д., Минх А. А. Гигиенические проблемы фторирования питьевой воды. Москва: Медицина, 1979. 200 с.

6. Горностаева Е. А., Фукс С. Л. Влияние фторсодержащих соединений на живые организмы (обзор) // Теоретическая и прикладная экология, 2017, № 1, с. 14-24.

7. ГОСТ 31867-2012. Вода питьевая. Определение содержания анионов методом хроматографии и капиллярного электрофореза. Москва: Стандартинформ, 2019. 20 с.

8. ГОСТ 31869-2012. Вода. Методы определения содержания катионов (аммония, бария, калия, кальция, лития, маг-

ния, натрия, стронция) с использованием капиллярного электрофореза. Москва: Стандартинформ, 2019. 22 с.

9. ГОСТ 31957-2012. Вода. Методы определения щелочности и массовой концентрации карбонатов и гидрокарбонатов. Москва: Стандартинформ, 2013. 29 с.

10. Иорданишивили А. К. Фториды: их значение для здоровья человека в современных условиях и перспективы использования // Курский научно-практический вестник «Человек и его здоровье», 2019, № 2, с. 66-73.

11. Ковальский В. В. Геохимическая экология. Москва: Наука, 1974. 299 с.

12. Микроэлементы человека (этиология, классификация, органопатология) / А. П. Авцын, А. А. Жаворонков, М. А. Риш, Л. С. Строчкова. Москва: Медицина, 1991. 496 с.

13. ПНД Ф 14.1:2:4.270-2012. Количественный химический анализ вод. Методика измерений массовой концентрации фторид-ионов в питьевых, природных и сточных водах потенциометрическим методом. Москва, 2012. 15 с.

14. Савенко А. В. Взаимодействие глинистых минералов с фторсодержащими водными растворами // Водные ресурсы, 2001, т. 28, № 3, с. 306-309.

15. Савенко А. В., Савенко В. С. Перспективы использования геохимических барьеров на основе глинистых минералов для оптимизации содержания фтора в природных и сточных водах // Наукоемкие технологии, 2020, т. 21, № 2-3, с. 88-94.

16. Савенко А. В., Савенко В. С. Экспериментальное изучение мобилизации фтора из магматических горных пород // Геохимия, 2020, т. 65, № 12, с. 1245-1248.

17. Савенко А. В., Савенко В. С., Ткаченко О. В. Фтор в поверхностных водах бассейнов Селенги и Аргуни // Материалы научной конференции с международным участием «Современные проблемы гидрохимии и мониторинга качества поверхностных вод», 2015, ч. 1, с. 258-262.

18. 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания. Москва, 2021. 988 с.

19. Современные представления о молекулярных механизмах физиологического и токсического действия соединений фтора на организм / А. Г. Жукова, Н. Н. Михайлова, А. С. Казицкая, Д. А. Алексина // Медицина в Кузбассе, 2017, т. 16, № 3, с. 4-11.

20. Weinstein L. H., Davison A. W. Fluorides in the environment: effects on plants and animals. Wallingford-Cambridge: CABI Publ., 2004. 296 p.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Поступила в редакцию: 04.06.2024

Принята к публикации: 01.09.2025

Distribution of Fluorine in Surface Waters of the Upper Don Basin During the Low-Water Period

A. V. Savenko[✉], V. S. Savenko, D. I. Shkolnyi

*Lomonosov Moscow State University, Russian Federation
(1, Leninskiye gory, Moscow, 119991)*

Abstract. The purpose is to determine the level of fluorine content in the surface waters of the Upper Don basin and its compliance with sanitary and hygienic requirements.

Materials and methods. During the winter low-water period of 2019 in the Upper Don basin, 30 water samples were taken from rivers and water reservoirs, determining the fluorine content, pH value, mineralization, and concentration of the main salt composition components. The following analytical methods were used: potentiometry (fluorine and pH), volumetric analysis (alkalinity $\approx \text{HCO}_3^-$), and capillary electrophoresis (other components of the main salt composition).

Results and discussion. The average fluorine content in surface waters of the Upper Don basin during the low-water period is 0.33 mg/L with a range of values 0.18–0.53 mg/L, which closely corresponds to earlier data for river waters of the Voronezh Region: 0.26 (0.10–0.45) mg/L. A close correlation between fluorine concentration and pH value ($r = 0.84$) was found in the absence of significant relationships with mineralization and major ion concentrations. The main factor leading to an increase in fluorine concentration with increasing pH is the displacement of structural and sorbed fluorine present in mineral phases by OH^- ions.

Conclusion. Due to the significantly lower level of fluorine content in surface waters of the Upper Don basin compared to the physiological optimum for humans (0.7–1.5 mg/L), it is recommended to conduct a detailed study of the fluorine distribution in underground waters of the region and to assess the prospects of their use for drinking water supply.

Key words: Upper Don basin, winter river runoff, fluorine, chemical composition.

Funding: This research was supported by a grant from the Russian Science Foundation No. 24-27-00275, <https://rscf.ru/en/project/24-27-00275/>.

For citation: Savenko A. V., Savenko V. S., Shkolnyi D. I. Distribution of Fluorine in Surface Waters of the Upper Don Basin During the Low-Water Period. *Vestnik Voronezskogo gosudarstvennogo universiteta. Seria: Geografia. Geoekologiya*, 2025, no. 3, pp. 169–175 (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.17308/geo/1609-0683/2025/3/169-175>

REFERENCES

1. Agalakova N. I., Gusev G. P. Effect of inorganic fluoride on living organisms of different phylogenetic level. *Journal of Evolutionary Biochemistry and Physiology*, 2011, vol. 47, no. 5, pp. 393–406.
2. Barkalova N. G., Zhaggar K. B. Nekotorye rezul'taty opredeleniya soderzhaniya ftora, bromi i ioda v rechnykh vodakh Voronezhskoi oblasti [Some results of determining the content of fluorine, bromine, and iodine in river waters of the Voronezh region]. *Gidrokhimicheskie materialy*, 1977, vol. 69, pp. 3–7. (In Russ.)
3. Belyakova T. M., Zhavoronkov A. A. Izuchenie endemicheskogo flyuoroza na kontinentakh zemnogo shara [Study of endemic fluorosis on the continents of the globe]. *Trudy Biogeokhimicheskoi laboratorii AN SSSR*, 1978, vol. 9, pp. 37–53. (In Russ.)
4. Brusilovskii S. A., Dvorov V. I. Nekotorye cherty gidrokhimii ftora v termal'nykh i drugikh tipakh prirodnnykh vod [Some features of fluorine hydrochemistry in thermal and other types of natural waters]. *Regional'naya geotermiya i rasprostranennost' termal'nykh vod v SSSR* [Regional geothermy and the abundance of thermal waters in the USSR]. Moscow: Nauka, 1967, pp. 298–308. (In Russ.)
5. Gabovich R. D., Minkh A. A. *Gigienicheskie problemy sfiorirovaniya pit'evoi vody* [Hygienic problems of drinking water fluoridation]. Moscow: Meditsina, 1979. 200 p. (In Russ.)
6. Gornostaeva E. A., Fuks S. L. Vliyanie ftorsoderzhashchikh soedinenii na zhivye organizmy (obzor) [The effect of fluorinated compounds on living organisms (review)]. *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya*, 2017, no. 1, pp. 14–24. (In Russ.)
7. GOST 31867-2012. *Voda pit'evaya. Opredelenie soderzhaniya anionov metodom khromatografii i kapillyarnogo elektroforeza* [GOST 31867-2012. Drinking water. Determination of anions content by chromatography and capillary electrophoresis method]. Moscow: Standartinform, 2019. 20 p. (In Russ.)
8. GOST 31869-2012. *Voda. Metody opredeleniya soderzhaniya kationov (ammoniya, bariya, kaliya, kal'tsiya, litiya, magniya, natriya, strontsiya) s ispol'zovaniem kapillyarnogo elektroforeza* [GOST 31869-2012. Water. Methods for the determination of cations (ammonium, barium, potassium, calcium, lithium, magnesium, sodium, strontium) content using capillary electrophoresis]. Moscow: Standartinform, 2019. 22 p. (In Russ.)
9. GOST 31957-2012. *Voda. Metody opredeleniya shchelochnosti i massovoi kontsentratsii karbonatov i gidrokarbonatov* [GOST 31957-2012. Water. Methods for determination of alkalinity and mass concentration of carbonates and hydrocarbonates]. Moscow: Standartinform, 2013. 29 p. (In Russ.)
10. Iordanishvili A. K. Ftorida: ikh znachenie dlya zdorov'ya cheloveka v sovremennykh usloviyakh i perspektivy ispol'zovaniya [Fluorides: their value for human health in modern conditions

- and prospects for their use]. *Kurskii nauchno-prakticheskii vestnik «Chelovek i ego zdorov'e»*, 2019, no. 2, pp. 66-73. (In Russ.)
11. Koval'skii V. V. *Geokhimicheskaya ekologiya* [Geochemical ecology]. Moscow: Nauka, 1974. 299 p. (In Russ.)
12. *Mikroelementozy cheloveka (etiologiya, klassifikatsiya, organopatologiya)* [Human microelementoses (etiology, classification, organopathology)] / A. P. Avtyn, A. A. Zhavoronkov, M. A. Rish, L. S. Strochkova. Moscow: Meditsina, 1991. 496 p. (In Russ.)
13. *PND F 14.1:2:4.270-2012. Kolichestvennyi khimicheskii analiz vod. Metodika izmerenii massovoi kontsentratsii sforid-ionov v pit'evykh, prirodnykh i stochnykh vodakh potentsiometricheskim metodom* [Environmental Regulatory Document Federal 14.1:2:4.270-2012. Quantitative chemical analysis of water. Methodology for measuring the mass concentration of fluoride ions in drinking, natural and waste waters using the potentiometric method]. Moscow, 2012. 15 p. (In Russ.)
14. Savenko A. V. Interaction between clay minerals and fluorine-containing solutions. *Water Resources*, 2001, vol. 28, no. 3, pp. 274-277.
15. Savenko A. V., Savenko V. S. Perspektivy ispol'zovaniya geokhimicheskikh bar'erov na osnove glinstykh mineralov dlya optimizatsii soderzhaniya ftora v prirodnykh i stochnykh vodakh [Prospects for use of the geochemical barriers based on clay minerals to optimization of fluorine content in natural and waste waters]. *Naukoemkie tekhnologii*, 2020, vol. 21, no. 2-3, pp. 88-94. (In Russ.)
16. Savenko A. V., Savenko V. S. Experimental study of fluorine mobilization from igneous rocks. *Geochemistry International*, 2020, vol. 58, no. 12, pp. 1386-1389.
17. Savenko A. V., Savenko V. S., Tkachenko O. V. Ftor v povrkhnostnykh vodakh basseinov Selenga i Arguni [Fluorine in surface waters of the Selenga and the Argun basins]. *Materialy nauchnoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Sovremennye problemy gidrokhimii i monitoringa kachestva poverkhnostnykh vod»*, 2015, part 1, pp. 258-262. (In Russ.)
18. *SanPiN 1.2.3685-21. Gigienicheskie normativy i trebovaniya k obespecheniyu bezopasnosti i (ili) bezvrednosti dlya cheloveka faktorov sredy obitaniya* [Sanitary Rules and Regulations 1.2.3685-21. Hygienic standards and requirements for ensuring safety and (or) harmlessness of environmental factors for humans]. Moscow, 2021, 988 p.
19. Sovremennye predstavleniya o molekulyarnykh mekhanizmakh fiziologicheskogo i toksicheskogo deistviya soedinenii ftora na organizm [Contemporary concepts of molecular mechanisms of the physiological and toxic effects of fluorine compounds on an organism] / A. G. Zhukova, N. N. Mikhailova, A. S. Kazitskaya, D. A. Alekhina. *Meditsina v Kuzbasse*, 2017, vol. 16, no. 3, pp. 4-11. (In Russ.)
20. Weinstein L. H., Davison A. W. *Fluorides in the environment: effects on plants and animals*. Wallingford-Cambridge: CABI Publ., 2004. 296 p.

Conflict of interests: The authors declare no information of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

Received: 04.06.2024

Accepted: 01.09.2025

Савенко Алла Витальевна

Доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории экспериментальной геохимии Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, г. Москва, Российская Федерация, ORCID: 0000-0001-9284-2878, e-mail: Alla_Savenko@rambler.ru

Савенко Виталий Савельевич

Доктор геолого-минералогических наук, профессор, ведущий научный сотрудник кафедры гидрологии суши Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, г. Москва, Российская Федерация, ORCID: 0000-0002-8399-4367, e-mail: Alla_Savenko@rambler.ru

Школьный Данила Игоревич

Научный сотрудник кафедры гидрологии суши Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, г. Москва, Российская Федерация, ORCID: 0009-0005-1954-8652, e-mail: thabigd@gmail.com

Alla V. Savenko

Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Leading Researcher at the Laboratory of Experimental Geochemistry, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation, ORCID: 0000-0001-9284-2878, e-mail: Alla_Savenko@rambler.ru

Vitaly S. Savenko

Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Prof., Leading Researcher at the Land Hydrology Department, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation, ORCID: 0000-0002-8399-4367, e-mail: Alla_Savenko@rambler.ru

Danila I. Shkolnyi

Researcher at the Land Hydrology Department, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation, ORCID: 0009-0005-1954-8652, e-mail: thabigd@gmail.com