

## ФТОР В ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОДАХ ОСТРОВА БЕРИНГА<sup>1</sup>

© 2020 г. В. С. Савенко<sup>a</sup>, А. В. Савенко<sup>a, \*</sup>

<sup>a</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,  
Москва, 119991 Россия

\*e-mail: Alla\_Savenko@rambler.ru

Поступила в редакцию 26.07.2017 г.

После доработки 20.12.2019 г.

Принята к публикации 24.12.2019 г.

Получены первые данные по содержанию фтора в поверхностных водах на о. Беринга (Командорские острова). Среднее содержание фтора составляет 0.23 мг F/л при диапазоне изменений 0.08–0.42 мг F/л, что в ~2 раза выше средней концентрации фтора в реках мира (~0.1 мг F/л), но соответствует его распространенности в реках Российской Восточной Арктики и Камчатки (0.15–0.21 мг F/л). Показано, что основными источниками фтора служат продукты выветривания и атмосферные выпадения.

*Ключевые слова:* фтор, поверхностные воды, фоновое содержание, о. Беринга.

**DOI:** 10.31857/S0321059620040185

При выявлении закономерностей водной миграции фтора – физиологически активного элемента, обладающего ярко выраженными токсическими свойствами, наибольшие затруднения связаны, как правило, с выяснением его генезиса и, в первую очередь, с определением вкладов естественных и антропогенных источников. Глобальное рассеяние антропогенного фтора, несомненно, влияет на количественные характеристики миграции этого элемента в окружающей среде [1], однако оценить масштабы этих изменений сложно из-за стремительного сокращения территорий, кардинально не нарушенных деятельностью человека. Очевидно, что изучение геохимических процессов на малоизмененных территориях может дать ценную информацию о естественной миграции химических элементов вообще и фтора в частности. Цель настоящей работы состояла в изучении распределения и генезиса фтора в поверхностных водах на о. Беринга, испытывающем минимальное антропогенное воздействие в силу своего географического расположения.

### ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Остров Беринга – самый крупный (1667 км<sup>2</sup>) в группе Командорских островов, расположенных на западном окончании Алеутской островной ду-

ги. Из природно-климатических характеристик [3, 5, 9, 13] необходимо отметить следующее.

Климат острова – холодный, влажный океанический с годовым количеством атмосферных осадков 470 мм. Максимальное количество осадков наблюдается в октябре–ноябре, минимальное – в феврале–июне. При высокой влажности воздуха осадки выпадают с низкой интенсивностью: 0.1–5 мм/сут (“морозящие дожди”). Снежный покров держится с конца ноября по середину мая.

Северная часть острова имеет выровненный рельеф, тогда как средняя и южная части представлены низкогорьем с сильно расчлененным рельефом. Речная сеть хорошо развита. Равнинные реки северной части, как правило, более глубокие и широкие, чем реки центральной и южной частей острова, которые часто оканчиваются береговыми уступами с водопадами высотой от 10 до 100–200 м. Лишь в немногих равнинных реках приливные воздействия распространяются на расстояния до 1 км вверх по течению. Большинство рек берут начало в горах и характеризуются снеговым или смешанным питанием. На острове много озер, самое крупное из них – оз. Саранное с площадью водного зеркала ~31 км<sup>2</sup> – расположено в северной части и имеет лагунное происхождение.

Литогенное основание водосборов сложено вулканическими и вулканогенно-осадочными породами андезитобазальтового состава, а также осадочными породами, образовавшимися в ре-

<sup>1</sup> Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 18–05–01133).



Рис. 1. Картограмма территории расположения станций (черные кружки) отбора проб поверхностных вод на о. Беринга.

зультате размыта и переотложения лавовых и пирокластических толщ. В развитых на этих породах почвах в значительном количестве содержатся неустойчивые минералы, что связано с низкой скоростью внутрипочвенного выветривания. Современная вулканическая деятельность на острове отсутствует.

В июне–июле 2006 г. из водных объектов острова было взято 18 проб (студентом географического факультета МГУ И.Р. Зариповым). Места отбора показаны на рис. 1. Концентрацию растворенного фтора определяли потенциометрическим методом с использованием фторидного ионоселективного электрода с мембраной из монокристалла  $\text{LaF}_3$  по методике [10]; содержание компонентов основного солевого состава – с помощью стандартных аналитических методик, ре-

комендованных в [6]. Погрешность измерений концентраций фтора и главных ионов составила  $\pm 4\%$ . Предел обнаружения фтора в растворах был на уровне  $10^{-6}$  М (0.02 мг/л).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты определения содержания фтора, а также минерализация, основной солевой состав вод о. Беринга и его типизация по классификации О.А. Алекина приведены в табл. 1. Диапазон концентрации фтора в отобранных пробах относительно узок – 0.08–0.42 мг F/л. При этом среднее содержание фтора в северной, центральной и южной частях острова различается незначительно – соответственно 0.24, 0.28 и 0.21 мг F/л. Общее среднее содержание фтора в поверхностных

водах на о. Беринга составляет  $0.23 \pm 0.08$  мг F/л. Эти величины согласуются со средними многолетними концентрациями фтора в водах рек близлежащих территорий: Индигирка — 0.21, Колыма — 0.15, Анадырь — 0.19, Камчатка — 0.18 мг F/л [4]. Среднее содержание фтора в реках мира в ~2 раза ниже: 0.1 мг F/л [2].

В двух пробах воды, отобранных из рек Голодной и Гаванской в зоне воздействия приливов, концентрации хлоридов аномально высокие — соответственно 569 и 301 мг/л. Очевидно, что это обусловлено поступлением морской воды во время приливов, и какая-то часть фтора имеет такое же происхождение. Количество фтора приливно-морского происхождения можно оценить, исходя из известных концентраций фтора и хлора в морской воде (1.3 и 19374 мг/л [8]) и считая, что весь хлор в этих пробах речной воды приливно-морского происхождения. При этих допущениях доли “приливной” морской воды ( $\alpha_{sw}$ , %) и приливно-морского фтора ( $\alpha_{sw-F}$ , %) будут равны:

$$\alpha_{sw} = 100 \times \frac{[Cl^-]_{rw}}{[Cl^-]_{sw}}, \quad (1)$$

$$\alpha_{sw-F} = 100 \alpha_{sw} \frac{[F^-]_{sw}}{[F^-]_{rw}}, \quad (2)$$

где  $[Cl^-]_{sw}$ ,  $[F^-]_{sw}$ ,  $[Cl^-]_{rw}$  и  $[F^-]_{rw}$  — концентрации (мг/л) хлора и фтора в морской и речной воде. Вычисленные по (1) и (2) доли морской воды в пробах из рек Голодной и Гаванской составили 2.9 и 1.6%, а доли в них фтора морского происхождения оказались равными 1.4 и 1.1%, что практически не влияет на общее содержание фтора.

При исключении двух рек (Голодной и Гаванской), испытывавших в момент отбора проб воздействие приливов, между концентрацией фтора и минерализацией ( $M$ ), а также содержанием главных анионов, натрия, калия и магния наблюдается положительная корреляция (табл. 2).

На о. Беринга отсутствует современная вулканическая активность, нет сколько-нибудь значимых антропогенных источников фтора, к тому же остров удален от территорий с интенсивной хозяйственной деятельностью. Это позволяет считать, что в поверхностные воды острова растворимый фтор поступает из двух главных источников. Первым источником служат влажные и сухие атмосферные выпадения, представленные в основном циклическими морскими солями; вторым — растворимые продукты выветривания горных пород на территории водосбора:

$$[F^-]_{rw} = x[F^-]_a + y[F^-]_w, \quad (3)$$

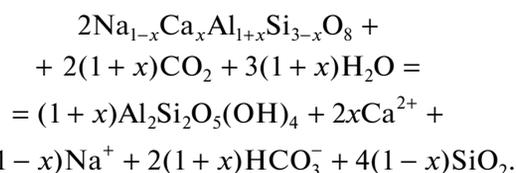
$x$  и  $y$  — массовые доли растворимых веществ в речных водах, связанные соответственно с поступлением циклических морских солей из атмо-

сферы и растворимых веществ из горных пород водосбора в результате их выветривания;  $[F^-]_{rw}$ ,  $[F^-]_a$  и  $[F^-]_w$  — концентрации растворимого фтора в речных водах, атмосферных выпадениях и продуктах выветривания.

Индикатором циклических морских солей традиционно считают хлор [7, 12]. В силу небольших размеров острова влияние морских аэрозолей должно распространяться на всю его территорию. С этим связаны повышенные концентрации хлоридов в атмосферных осадках над островом по сравнению с концентрациями, характерными для территорий, удаленных от побережий на несколько десятков километров [7]. Растворимые вещества, включая фториды, в атмосферных выпадениях над океаном и небольшими островами почти полностью представлены солями морской воды, в которых хлориды — главный компонент [11, 12]. Поэтому можно допустить, что для о. Беринга вклад атмосферного источника фтора в его содержание в поверхностных водах ( $x$ ) пропорционален наблюдаемым там концентрациям хлоридов:

$$x[F^-]_a = k_1[Cl^-]_{rw}. \quad (4)$$

Лучший индикатор растворимых продуктов выветривания, по-видимому, — бикарбонат-ионы, которые образуются в процессе выветривания силикатов вулканогенных пород, составляющих литогенную основу территории о. Беринга:



В этом случае количество фтора, мобилизованного из горных пород при выветривании, должно быть пропорционально концентрации растворенных бикарбонатов:

$$y[F^-]_w = k_2[HCO_3^-]_{rw}. \quad (5)$$

Подставив (4) и (5) в (3), получаем линейную зависимость отношения  $F^-/Cl^-$  от  $HCO_3^-/Cl^-$ :

$$\frac{[F^-]_{rw}}{[Cl^-]_{rw}} = k_1 + k_2 \frac{[HCO_3^-]_{rw}}{[Cl^-]_{rw}}. \quad (6)$$

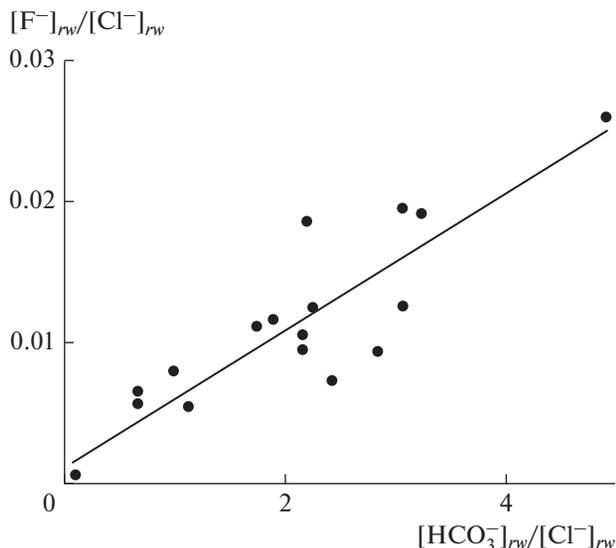
Показанная на рис. 2 зависимость  $[F^-]_{rw}/[Cl^-]_{rw}$  от  $[HCO_3^-]_{rw}/[Cl^-]_{rw}$  соответствует (6) с параметрами  $k_1$  и  $k_2$ , равными 0.0013 и 0.0047, при коэффициенте корреляции  $r = 0.89$ . Это подтверждает предположение о доминирующей роли двух источников фтора в поверхностных водах на о. Беринга — продуктов выветривания и атмосферных выпадений.

Таблица 1. Минерализация (M), содержание фтора и главных ионов в поверхностных водах на о. Беринга, а также их классификация по химическому составу

№ станции	Водный объект	M мг/л	F <sup>-</sup>		Cl <sup>-</sup>		SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>		HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>		Na <sup>+</sup>		K <sup>+</sup>		Mg <sup>2+</sup>		Ca <sup>2+</sup>		Тип вод
			мг/л	%-экв.	мг/л	%-экв.	мг/л	%-экв.	мг/л	%-экв.	мг/л	%-экв.	мг/л	%-экв.	мг/л	%-экв.	мг/л	%-экв.	
1	р. Саранная	66.0	0.08	11.0	16.6	9.1	26.8	23.5	8.60	20.0	0.60	0.8	0.72	3.2	10.1	26.9	C <sub>II</sub> <sup>Ca</sup>		
2	оз. Саранное	102	0.22	34.4	30.5	7.9	23.2	12.0	19.4	26.5	2.00	1.6	4.10	10.6	6.92	10.9	C <sub>III</sub> <sup>Na</sup>		
3	р. Шангинская	145	0.34	43.0	28.2	5.8	42.7	16.3	31.2	31.5	4.10	2.4	2.66	5.1	9.22	10.7	C <sub>I</sub> <sup>Na</sup>		
4	р. Ладьгинская	212	0.42	74.6	32.0	4.4	50.6	12.6	55.8	36.9	5.10	2.0	5.55	6.9	6.80	5.2	C <sub>I</sub> <sup>Na</sup>		
5	р. Гаванская	586	0.18	301	42.4	2.9	31.1	2.5	187	40.6	9.70	1.2	17.3	7.1	12.6	3.1	C <sub>III</sub> <sup>Na</sup>		
6	р. Старогаванская	97.3	0.22	19.8	19.0	9.3	34.8	19.4	12.5	18.5	1.20	1.0	5.55	15.5	10.2	17.3	C <sub>III</sub> <sup>Na</sup>		
7	р. Каменка	137	0.26	21.0	14.9	15.7	47.6	19.7	18.6	20.4	1.20	0.8	6.87	14.2	11.4	14.3	C <sub>II</sub> <sup>Na</sup>		
8	р. Буян	108	0.20	16.0	14.4	8.0	49.4	25.9	14.1	19.6	0.80	0.7	5.73	15.1	10.3	16.4	C <sub>II</sub> <sup>Na</sup>		
9	р. Никитинская	142	0.35	13.5	9.6	12.6	66.5	27.4	13.1	14.3	0.50	0.3	6.87	14.2	17.2	21.5	C <sub>II</sub> <sup>Ca</sup>		
10	р. Водопадная	102	0.29	14.9	14.4	8.5	45.8	25.6	13.3	19.8	0.60	0.5	3.74	10.5	12.1	20.7	C <sub>II</sub> <sup>Ca</sup>		
11	руч. Гладковский	69.4	0.19	9.94	14.4	8.8	32.3	27.3	6.40	14.3	0.50	0.7	2.05	8.7	10.1	25.9	C <sub>II</sub> <sup>Ca</sup>		
12	р. Командор	95.9	0.23	19.9	19.9	6.0	37.8	22.0	14.4	22.2	1.00	0.9	2.77	8.1	11.9	21.0	C <sub>II</sub> <sup>Na</sup>		
13	р. Голодная	1050	0.26	569	44.8	2.8	60.4	2.8	293	35.5	13.3	0.9	44.0	10.1	22.8	3.2	C <sub>III</sub> <sup>Na</sup>		
14	р. Лисинская	79.9	0.14	14.9	17.9	7.3	32.3	22.6	11.5	21.3	0.80	0.9	2.77	9.7	9.50	20.2	C <sub>II</sub> <sup>Na</sup>		
15	р. Серебрянникова	114	0.18	33.4	27.7	5.0	37.8	18.2	20.2	25.8	2.20	1.7	4.10	9.9	8.00	11.7	C <sub>III</sub> <sup>Na</sup>		
16	оз. Серебрянникова	74.4	0.13	12.4	15.7	13.0	26.9	19.8	8.20	16.0	0.60	0.7	4.82	17.8	7.56	16.9	C <sub>III</sub> <sup>Mg</sup>		
17	р. Бобровая	163	0.25	27.0	16.8	7.3	76.9	27.8	21.7	20.8	2.40	1.4	7.33	13.3	11.4	12.6	C <sub>I</sub> <sup>Na</sup>		
18	То же	75.8	0.25	13.5	17.2	11.3	29.9	22.1	7.82	15.3	0.50	0.6	4.33	16.1	7.77	17.5	C <sub>III</sub> <sup>Ca</sup>		

**Таблица 2.** Корреляционные связи между содержанием фтора и главных ионов в поверхностных водах на о. Беринга

Компонент	<i>M</i>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>
<i>r</i>	0.82	0.64	0.43	0.57	0.71	0.61	0.46	0.21

**Рис. 2.** Зависимость между соотношениями F/Cl и HCO<sub>3</sub>/Cl в поверхностных водах на о. Беринга.

### ВЫВОДЫ

Среднее содержание фтора в поверхностных водах на о. Беринга составляет 0.23 мг F/л при диапазоне концентраций 0.08–0.42 мг F/л. Это несколько выше средней концентрации фтора в реках мира (~0.1 мг F/л), но соответствует его распространенности в реках российской восточной Арктики и Камчатки (0.15–0.21 мг F/л).

Основные источники фтора в поверхностных водах острова — продукты выветривания и поступающие через атмосферу циклические морские соли.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гладушко В.И.* Техногенное рассеивание фтора в окружающей среде и его последствия // *Агрохимия*. 1991. № 11. С. 84–88.
2. *Гордеев В.В.* Геохимия системы река–море. М., 2012. 452 с.
3. *Иващенко Р.У., Козакова Э.Н., Сергеев К.Ф., Сергеева В.Б., Стрельцов М.И.* Геология Командорских островов. Владивосток: Изд-во ДВНЦ АН СССР, 1984. 193 с.
4. *Коновалов Г.С., Коренева В.И.* Вынос микроэлементов речным стоком с территории СССР в моря в современный период // *Гидрохим. материалы*. 1979. Т. 75. С. 11–21.
5. *Курсанова И.А., Савченко В.Г.* Климат Командорских островов // *Вопр. географии Камчатки*. 1966. Вып. 4. С. 11–22.
6. *Лурье Ю.Ю.* Унифицированные методы анализа вод. М.: Химия, 1971. 375 с.
7. *Петренчук О.П.* Экспериментальные исследования атмосферного аэрозоля. Л.: Гидрометеиздат, 1979. 264 с.
8. *Попов Н.И., Федоров К.Н., Орлов В.М.* Морская вода. М.: Наука, 1979. 327 с.
9. *Природные ресурсы Командорских островов*. М.: Изд-во МГУ, 1991. 215 с.
10. *Савенко В.С.* Введение в ионометрию природных вод. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 77 с.
11. *Савенко В.С.* Средний элементарный химический состав океанского аэрозоля // *ДАН СССР*. 1988. Т. 299. № 2. С. 465–468.
12. *Савенко В.С.* Факторы, определяющие распространность химических элементов в океанском аэрозоле // *ДАН*. 1994. Т. 339. № 5. С. 670–674.
13. *Шмидт О.А.* Тектоника Командорских островов и структура Алеутской гряды. М.: Наука, 1978. 100 с.