

РЕГИОНАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

УДК 550.42

А.В. Савенко¹, В.С. Савенко², А.Н. Иванов³**ФТОР В ВОДНЫХ ОБЪЕКТАХ О. МАТУА (ЦЕНТРАЛЬНЫЕ КУРИЛЫ)**

Получены первые данные о содержании фтора в поверхностных (ручьи, озерки) и подземных (родники) водах о. Матуа. Концентрация фтора находится в диапазоне 9,2–307 мкг F/л, составляя в среднем ~95 мкг F/л, что соответствует среднему значению для рек мира, но в 1,5–2 раза ниже среднего содержания фтора в речных водах Японии и Камчатки. Сделан вывод, что основными источниками фтора на острове служат циклические морские соли, растворимые продукты выветривания и вулканические эксгалации, играющие важную роль даже в период пониженной вулканической активности перед следующим извержением вулкана Пик Сарычева.

Ключевые слова: Курильские острова, остров Матуа, поверхностные воды, подземные воды, источники фтора

Введение. Области островодужного вулканизма, как известно, характеризуются сочетанием на небольших территориях активно действующих эндогенных и экзогенных факторов, взаимодействие которых приводит к формированию специфических черт природной среды. Особый интерес представляют острова с низкой интенсивностью хозяйственной деятельности или с ее практически полным отсутствием, для которых можно исключить влияние антропогенного фактора. К таким объектам относится о. Матуа, расположенный в средней части Курильской островной дуги. Этот небольшой остров площадью 52 км² не заселен, и только во время Второй мировой войны здесь недолго располагалась военная база Японии. На острове расположен вулкан Пик Сарычева, извергавшийся с середины XVIII в. до начала XXI в. 10 раз (примерно одно извержение каждые 25 лет). Последние два извержения происходили в июне 2009 г. и в ноябре 2017 г. с интервалом 8,5 лет. По химическому составу лавово-пепловый материал относится к андезитобазальтам [Дегтерев, 2011; Дегтерев с соавт., 2011]. Крайне малая антропогенная нагрузка, постоянная вулканическая деятельность с периодами активизации и спада, а также небольшие размеры острова, способствующие распространению воздействия океана на всю территорию, позволяют рассматривать о. Матуа как исключительно удобный объект для изучения взаимодействия вулканогенных и экзогенных процессов.

Фтор входит в группу химических элементов, концентрирующихся в высокотемпературных магматических флюидах, в силу чего наибольшая интенсивность поступления вулканогенного фтора в

окружающую среду наблюдается в периоды активизации вулканической деятельности, после которых его вынос снижается. Цель настоящей работы состояла в установлении фонового уровня и закономерностей распределения фтора в водных объектах о. Матуа в период пониженной вулканической активности (за 1,5 года до последнего извержения вулкана Пик Сарычева).

Материал и методы исследований. Материал для настоящего исследования был собран в мае-июне 2016 г. во время экспедиции, организованной Русским географическим обществом и Министерством обороны РФ. Территория отбора проб воды охватывала все три типа имеющихся на острове местностей: вулканическую пустыню, вулканические постройки древнего вулкана Матуа и морские террасы [Иванов, 2017].

Вулканическая пустыня, сформированная извержениями вулкана Пик Сарычева, охватывает северную и северо-западную части острова. К юго-востоку от нее находятся вулканические постройки древнего вулкана Матуа, представленные крутыми склонами кальдеры, фрагментами разновозрастных вулканических плато, древними лавовыми потоками и пирокластическими отложениями. В юго-восточной части острова расположены морские террасы разной высоты: от 2–3 до 60–70 м. Террасы высотой до 25 м несут следы воздействий мощных цунами. Во время Второй мировой войны Японией здесь были построены фортификационные сооружения, сохранившиеся до сих пор.

Несмотря на достаточно большое количество атмосферных осадков (1278 мм/год), на острове практически отсутствуют постоянные водотоки,

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геохимии, ст. науч. с., канд. геогр. н.; *e-mail:* alla_savenko@rambler.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра гидрологии суши, вед. науч. с., докт. геол.-минерал. н., профессор; *e-mail:* alla_savenko@rambler.ru

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра физической географии и ландшафтоведения, доцент, канд. геогр. н.; *e-mail:* a.n.ivanov@mail.ru

поскольку подавляющая часть осадков инфильтруется в рыхлые и грубые пирокластические отложения, образуя подземные воды, состав которых должен в значительной степени определяться взаимодействием в системе вода–порода.

Отбор проб производился на семи полигонах в разных частях острова (рис. 1) и на близлежащем маленьком о. Топорковый. Всего было отобрано 30 проб воды.

В вулканической пустыне были отобраны две пробы воды из ручьев, вытекающих из снежников на шлаковых полях (точки отбора проб 22 и 17). Также была взята проба воды в восточной части острова в точке 27, находящейся под мысом Клюв в нижней части ручья перед его выходом на пляж.

В окрестностях бухты Айну разгрузка подземных вод происходит с наибольшей интенсивностью. Здесь было собрано 19 проб. Проба снега взята в точке 16 на крутом уступе над бухтой; родниковая

вода – на контакте древних лавовых потоков и морской террасы высотой ~20 м над уровнем моря (точка 29), а также в окончании бухты недалеко от пляжа на высоте 3 м над уровнем моря на границе с древними лавовыми отложениями (точка 9). Еще 11 проб воды из ручьев отобраны в пределах эрозионно-суффозионной ложбины на контакте двух морских террас высотой 15 и 10 м над уровнем моря (точки 13, 5, 11, 6, 8, 4, 10 и 14), а также четыре пробы воды взяты из небольших запрудных озер (точки 7 и 3). В небольшом озерке, образовавшемся, вероятно, в воронке от взрыва (точка 21), отобрана проба льда.

Вторая большая зона разгрузки подземных вод расположена на юго-востоке острова под часовой в местах контакта морских террас высотой 40 и 2 м над уровнем моря. Пробы воды из ручьев были взяты на севере (точка 18), в центральной части (точка 12) и на южном окончании этой зоны (точка 19).

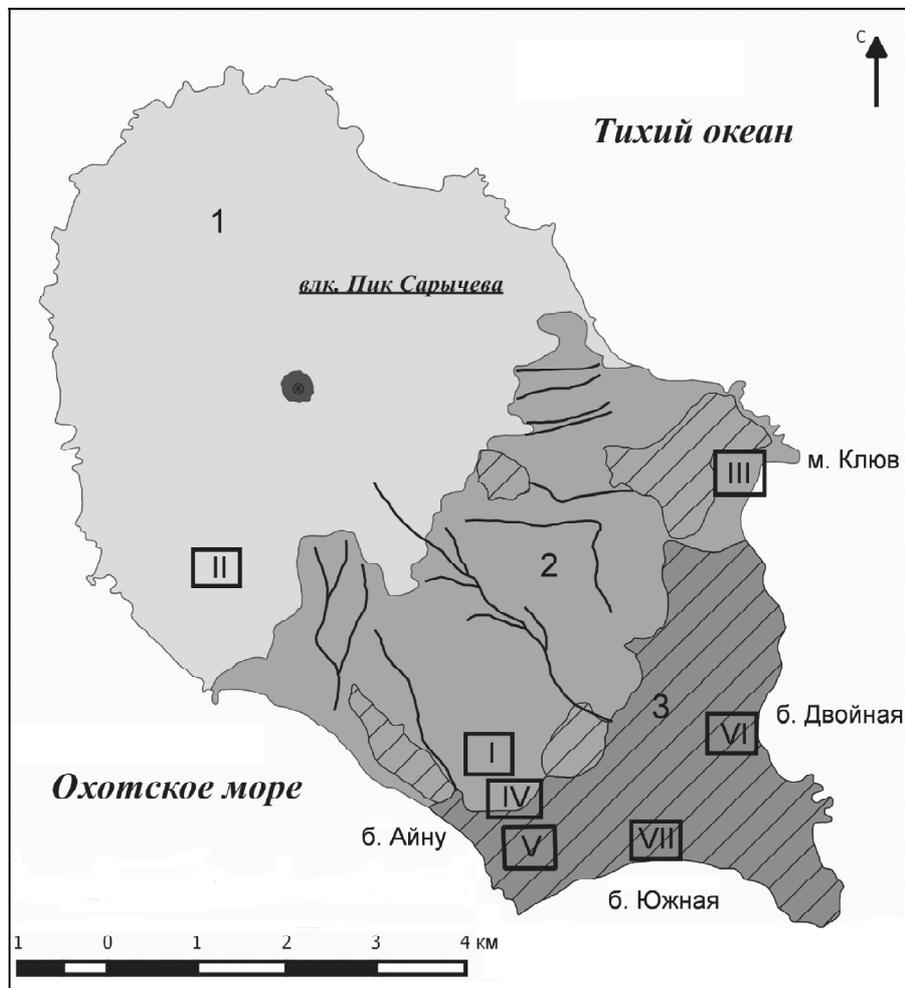


Рис. 1. Карта-схема географических местностей и расположение полигонов отбора проб воды на о. Матуа: 1 – вулканическая пустыня; 2 – постройки древнего вулкана; 3 – морские террасы; штриховкой показана область расположения фортификационных сооружений; I (1), II (2), III (1), IV (1), V (17), VI (5), VII (2) – номера полигонов пробоотбора в соответствии с табл. 1 (в скобках указано количество отобранных проб на каждом полигоне)

Fig. 1. Schematic map of geographic areas and location of water sampling polygons in the Matua Island: (1) volcanic desert; (2) structures of the ancient volcano; (3) sea terraces; shading is for military fortifications; I (1), II (2), III (1), IV (1), V (17), VI (5), VII (2) are numbers of sampling polygons according to Table 1 (in brackets number of samples taken at each polygon)

Еще две пробы воды были отобраны в точках 15 и 20 на юге острова из небольших болотных озерков, возможно, термокарстового происхождения. Последняя проба воды (точка 28) была взята из озера на соседнем о. Топорковый, где расположен «птичий базар».

Величину рН измеряли *in situ* портативным потенциометром. Затем отобранные пробы воды помещали в полипропиленовые емкости и в лаборатории в фильтрате определяли содержание фтора потенциометрическим методом с фторидным ионоселективным электродом в присутствии ацетатного солевого буфера [Савенко, 1986], концентрации компонентов основного солевого состава (Na, K, Mg, Ca, Cl, SO₄) методом капиллярного электрофореза [Комарова, Каменцев, 2006], а также величину общей щелочности (»HCO₃⁻) объемным ацидиметрическим методом [Лурье, 1971]. Для анализа содержания растворенного кремния колориметрическим методом с молибдатом аммония [Лурье, 1971] пробы воды на месте отфильтровали через мембранный фильтр 0,45 мкм в полипропиленовые флаконы и добавляли туда небольшое количество хлороформа. Погрешность определений не превышала ±4%. Предел обнаружения фтора в растворах находился на уровне 0,02 мг/л.

Результаты исследований и их обсуждение.

Результаты определения содержания фтора, ионов основного солевого состава и растворенного кремния в пробах поверхностных и подземных вод о. Матуа приведены в табл. 1.

Минимальные концентрации фтора (12,0±2,6 мкг F/л) отмечались в снеге со склона застывших лавовых потоков над бухтой Айну и в слабоминерализованных водах ручьев, вытекающих из снежников вулканической пустыни. Более высокие концентрации наблюдались в водах маленьких озер, расположенных в болотах в южной низинной части острова (23,4±2,3 мкг F/л) и на о. Топорковый (62,7 мкг F/л). В озерах в зоне разгрузки подземных вод на контакте морских террас высотой 15 и 10 м содержание фтора находилось в диапазоне 54,1–131 мкг F/л при среднем значении 90,1 мкг F/л.

В родниках и ручьях, образовавшихся при разгрузке подземных вод в разных частях острова, содержание фтора значимо различалось. В ручьях из зоны разгрузки подземных вод в бухту Двойную под часовой концентрация фтора составила в среднем 55,9 мкг F/л при диапазоне измеренных значений 48,4–61,6 мкг F/л. Более высокая концентрация фтора – 74,2 мкг F/л – была отмечена в ручье из зоны разгрузки подземных вод под мысом Ключ. В бухте Айну в ручьях из зоны разгрузки на границе морских террас высотой 15 и 10 м среднее содержание фтора составило 117 (51,6–307) мкг F/л. В воде ручья, вытекающего из зоны контакта древних лавовых потоков и морской террасы высотой 20 м, была зафиксирована концентрация фтора 207 мкг F/л.

При исключении снега и ручьев из снежников среднее содержание фтора в водах родников, ручьев и озерков о. Матуа составляет ~95 мкг F/л, что в

1,5–2 раза ниже средней концентрации фтора в речных водах близлежащих территорий (Япония, Камчатка), но соответствует среднему значению для рек мира (табл. 2).

Содержание фтора в поверхностных и подземных водах о. Матуа не имеет значимых корреляционных связей с величиной рН, минерализацией, концентрациями ионов основного солевого состава и растворенного кремния (табл. 3).

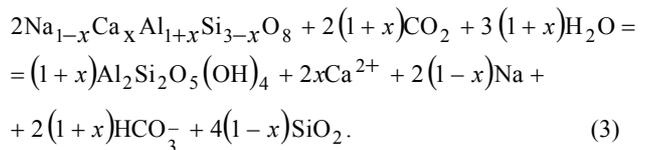
В силу отсутствия на о. Матуа хозяйственной деятельности на содержание растворенного фтора влияют три основных фактора: поступление циклических морских солей через атмосферу, выветривание горных пород и вынос вулканических эксгалиций – газовой составляющей современных вулканических извержений. Если предположить, что в период пониженной вулканической активности вклад вулканических эксгалиций имеет второстепенное значение, то содержание фтора в водах о. Матуа ($[F^-]_{hw}$) будет определяться первыми двумя факторами:

$$[F^-]_{hw} = x[F^-]_a + y[F^-]_w, \tag{1}$$

где x и y – массовые доли атмосферных выпадений и продуктов выветривания в водах; $[F^-]_a$ и $[F^-]_w$ – концентрации фтора в атмосферных выпадениях и продуктах выветривания. Элементом-индикатором морских циклических солей обычно считают хлор [Петренчук, 1979], поэтому можно допустить, что вклад атмосферного источника фтора в водах (x) пропорционален наблюдаемым концентрациям хлоридов:

$$x[F^-]_a = k_1[Cl^-]_{hw}, \tag{2}$$

где k_1 – коэффициент пропорциональности; $[Cl^-]_{hw}$ – концентрация хлоридов в водах острова. Содержание бикарбонат-ионов в водах служит, по-видимому, лучшим индикатором поступления растворенных компонентов в результате процессов выветривания горных пород:



Допустив, что количество фтора, мобилизованного из горных пород при выветривании, пропорционально концентрации бикарбонатов

$$y[F^-]_w = k_2[HCO_3^-]_{hw}, \tag{4}$$

из (1), (2) и (4) получим:

$$\frac{[F^-]_{hw}}{[Cl^-]_{hw}} = k_1 + k_2 \frac{[HCO_3^-]_{hw}}{[Cl^-]_{hw}}. \tag{5}$$

Как показано на рисунке 2, А, для вод о. Матуа связь между отношениями $[F^-]_{hw}/[Cl^-]_{hw}$ и $[HCO_3^-]_{hw}/[Cl^-]_{hw}$ практически отсутствует ($r = 0,11$), что можно рассматривать в качестве свидетельства

Таблица 1

Величина pH, минерализация (M) и концентрации растворенных форм компонентов основного солевого состава, кремния и фтора в поверхностных и подземных водах о. Матуа

№ точки отбора пробы	Описание	Дата отбора	pH	M	Na	K	Mg	Ca	Cl	SO ₄	HCO ₃	Si	F
				мг/л									
I. Атмосферные осадки (снег)													
16	Снег на склоне лавовых потоков над бухтой Айну	30.05.2016	6,07	8,79	2,26	0,29	0,12	0,36	3,46	0,78	1,53	0,15	14,2
II. Ручьи из снежников в вулканической пустыне													
22	Ручей в среднем течении	06.06.2016	5,71	2,97	0,73	0,20	0,04	0,08	1,02	0,28	0,61	0,11	9,2
17	Ручей в нижнем течении, протекающий через травяную лужайку	31.05.2016	5,78	9,77	2,26	0,30	0,22	0,44	3,55	1,19	1,83	0,21	12,6
III. Зона разгрузки подземных вод под мысом Клюв													
27	Ручей грунтового питания	12.06.2016	7,25	250	67,4	3,38	7,79	9,96	127	18,7	15,9	6,86	74,2
IV. Зона разгрузки подземных вод в бухту Айну на контакте древних лавовых потоков и морской террасы высотой 20 м													
29	Родник на контакте древних лавовых потоков и морских террас	18.06.2016	6,95	88,8	19,7	1,40	2,87	6,22	31,4	15,6	11,6	10,1	207
V. Зона разгрузки подземных вод в бухту Айну на контакте морских террас высотой 15 и 10 м, водотоки													
9	Родник на границе нижней морской террасы, пляжа и древних лавовых потоков	26.05.2016	7,01	92,6	14,8	1,72	3,09	8,23	21,3	18,0	25,6	22,2	307
13	Родник на выходе на нижнюю морскую террасу	29.05.2016	–	80,0	18,6	1,16	2,58	5,28	30,9	11,7	9,76	8,15	136
5	Ручей Хесупо, исток	25.05.2016	6,95	100	18,5	1,57	2,75	9,21	29,3	14,7	24,4	15,7	66,9
5a	То же	23.06.2016	6,74	103	18,0	1,55	2,97	9,51	26,8	16,2	28,1	16,9	66,5
11	Ручей Хесупо, нижнее течение	26.05.2016	7,36	87,3	15,8	1,43	2,33	7,84	25,5	14,3	20,1	11,0	59,0
11a	То же	23.06.2016	7,55	101	18,0	1,29	2,88	9,24	27,0	16,3	26,2	12,3	63,8
6	Дальний ручей, верховье	25.05.2016	6,53	79,1	18,4	1,30	2,32	4,83	28,8	10,1	13,4	7,24	103
8	Дальний ручей, нижнее течение	25.05.2016	7,26	82,0	17,8	1,17	2,77	5,55	28,6	9,68	16,5	7,40	99,7
8a	То же	23.06.2016	6,95	83,0	17,8	1,19	2,94	5,68	28,9	10,7	15,9	8,31	122
4	Ручей к западу от дамбы, среднее течение	25.05.2016	7,58	88,6	16,2	1,28	2,24	7,51	26,2	15,0	20,1	11,0	51,6
10	Малый ручей, нижнее течение	26.05.2016	–	80,4	18,2	1,69	2,29	4,78	29,0	14,6	9,76	8,07	174
14	Ручей при выходе на пляж, нижнее течение	30.05.2016	7,76	123	31,3	2,02	3,51	4,29	46,5	18,5	17,1	8,07	156
Там же, озерки													
7	Озеро в долине Дальнего ручья	25.05.2016	7,31	82,2	18,5	1,33	2,46	5,03	29,2	9,83	15,9	7,49	103
7a	То же	23.06.2016	6,80	87,7	19,5	1,29	3,15	5,82	28,0	10,4	19,5	8,29	131
3	Большое озеро вблизи дамбы	25.05.2016	7,66	90,3	18,3	1,40	2,44	6,98	28,4	13,3	19,5	10,1	54,1
3a	То же	23.06.2016	6,96	103	18,3	1,24	2,89	9,44	28,1	15,8	27,5	12,0	72,4
21	Лед на малом озере на востоке зоны разгрузки	04.06.2016	5,76	16,6	4,18	0,42	0,62	0,52	6,72	2,35	1,83	0,53	15,1
VI. Зона разгрузки подземных вод в бухту Двойную под часовой на контакте морских террас высотой 40 и 2 м													
18	Ручей в северной части бухты	01.06.2016	6,86	109	21,4	2,19	2,91	9,97	34,1	10,8	27,5	18,4	53,0
12	Ручей под часовой	28.05.2016	7,16	108	22,0	2,29	3,07	8,71	36,1	11,4	24,4	19,6	61,0
12a	То же	23.06.2016	6,95	108	21,2	2,18	3,17	8,75	34,6	11,5	26,8	18,4	61,6
19	Ручей в южной части бухты	01.06.2016	7,24	142	22,7	2,01	4,38	14,1	34,1	16,9	48,2	22,2	48,4
19a	То же	11.06.2016	7,78	133	18,0	2,04	4,66	15,5	25,7	18,5	48,8	23,4	55,4
VII. Озерки среди береговых валов в бухте Южной													
15	Термокарстовое озерко в болоте	30.05.2016	6,12	36,8	9,58	0,81	0,97	1,13	13,5	4,76	6,10	1,09	25,7
20	Зарастающее озерко в болоте	04.06.2016	6,17	22,2	5,98	0,56	0,40	0,51	7,83	2,68	4,27	0,18	21,1
Остров Топорковый													
28	Озерко недалеко от «птичьего базара»	13.06.2016	6,17	105	28,6	1,71	3,13	2,67	43,1	10,7	14,6	4,58	62,7

Т а б л и ц а 2

Средние концентрации фтора в водных объектах о. Матуа в сравнении с литературными данными

Объект	Концентрация фтора (F, мкг/л)
о. Матуа, данная работа	
Снег и ручьи из снежников	12,0
Ручей в зоне разгрузки подземных вод под мысом Клюв	74,2
Ручей в зоне разгрузки подземных вод на контакте древних лав и морской террасы 20 м, бухта Айну	207
Ручьи и родники в зоне разгрузки подземных вод на контакте морских террас 15 и 10 м, бухта Айну	117
Озерки, там же	90,1
Ручьи в зоне разгрузки подземных вод на контакте морских террас 40 и 2 м, под часовней	55,9
Озерки в южной части острова	23,4
Озерко на о. Топорковый	62,7
<i>Поверхностные и подземные воды острова*</i>	95
Литературные данные	
<i>Речные воды, Япония</i> [Сугавара, 1964]	150
<i>Р. Камчатка</i> [Коновалов, Коренева, 1979]	180
<i>Реки мира</i> [Гордеев, 2012]	100

* Без проб снега, воды ручьев из снежников и озерного льда (т. 16, 22, 17 и 21).

Т а б л и ц а 3

Связь содержания фтора в поверхностных и подземных водах с величиной рН, минерализацией, концентрациями ионов основного солевого состава и растворенного кремния

Компонент	рН	M	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Si
Коэффициент корреляции (r)	0,37	0,37	0,42	0,37	0,43	0,18	0,41	0,55	0,11	0,32

неправомерности допущения (1) и, следовательно, доказательства существенного вклада фтора вулканических эксгальций. Это подтверждается высоким коэффициентом корреляции ($r = 0,89$) аналогичной зависимости для поверхностных вод о. Беринга (Алеутская островная дуга) [Савенко, Савенко, 2019], на котором последние проявления вулканизма завершились в плиоцене – раннем плейстоцене, а также выполнением соотношений вида (5) в водах о. Матуа для тех элементов, главными источниками которых заведомо являются циклические морские соли и выветривание: кальция, магния и кремния с коэффициентом корреляции r , равным соответственно 0,93, 0,80 и 0,84 (рис. 2, Б, В, Г).

Таким образом, с большой долей вероятности можно утверждать, что содержание фтора в поверхностных и подземных водах о. Матуа контролируется тремя главными факторами: атмосферным поступлением циклических морских солей, мобилизацией растворенных форм химических элементов при

выветривании горных пород и выносом вулканических эксгальций. Продолжение мониторинга в периоды усиления и ослабления вулканической активности позволит подойти к количественной оценке соотношения указанных факторов.

Выводы:

– содержание фтора в поверхностных (ручьи, озерки) и подземных (родники) водах о. Матуа находится в диапазоне 9,2–307 мкг F/л при среднем значении ~95 мкг F/л. Это в 1,5–2 раза ниже средней концентрации фтора в речных водах близлежащих территорий (Япония, Камчатка), но соответствует среднему содержанию в реках мира;

– основными источниками фтора на острове являются поступающие из атмосферы циклические морские соли, растворимые продукты выветривания горных пород и вулканические эксгальции, играющие важную роль даже в период пониженной вулканической активности перед следующим извержением вулкана Пик Сарычева.

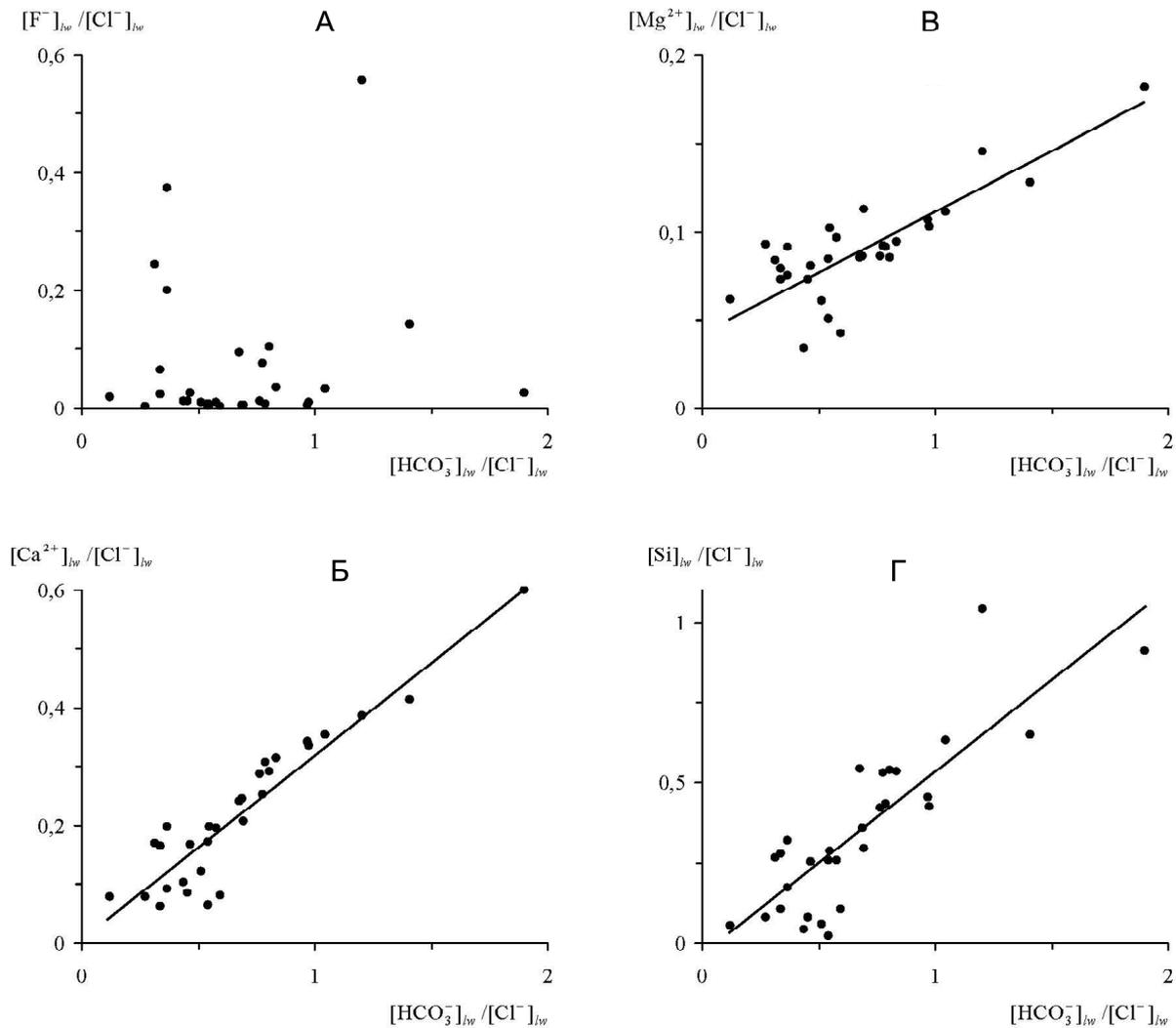


Рис. 2. Взаимосвязь между отношениями $[i]_{hw} / [Cl^-]_{hw}$ и $[HCO_3^-]_{hw} / [Cl^-]_{hw}$ в водах о. Матуа: $i =$ (А), Ca^{2+} (Б), Mg^{2+} (Б), Si (Г)

Fig. 2. The relationship between $[i]_{hw} / [Cl^-]_{hw}$ and $[HCO_3^-]_{hw} / [Cl^-]_{hw}$ ratios in the Matua Island waters: $i = F^-$ (А), Ca^{2+} (Б), Mg^{2+} (Б), Si (Г)

Благодарности. Исследование выполнено за счет грантов РФФИ (проект № 18-05-01133) и РГО (проект № 02/2017-Р).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гордеев В.В. Геохимия системы река–море. М., 2012. 452 с.
- Дегтерев А.В. Петрохимические особенности продуктов современных извержений вулкана Пик Сарычева, остров Матуа (Курилы) // Вестн. ДВО РАН. 2011. № 6. С. 94–99.
- Дегтерев А.В., Рыбин А.В., Разжигаева Н.Г. Исторические извержения вулкана Пик Сарычева (о. Матуа, Курильские острова) // Вестн. КРАУНЦ. Науки о Земле. 2011. № 1. С. 102–119.
- Иванов А.Н. Остров Матуа: активный вулкан и военная база // Природа. 2017. № 2. С. 18–26.
- Комарова Н.В., Каменцев Я.С. Практическое руководство по использованию систем капиллярного электрофореза «КА-ПЕЛЬ». СПб.: Веда, 2006. 212 с.
- Коновалов Г.С., Коренева В.И. Вынос микроэлементов речным стоком с территории СССР в моря в современный период // Гидрохимич. материалы. 1979. Т. 75. С. 11–21.
- Лурье Ю.Ю. Унифицированные методы анализа вод. М.: Химия, 1971. 375 с.
- Петренчук О.П. Экспериментальные исследования атмосферного аэрозоля. Л.: Гидрометеиздат, 1979. 264 с.
- Савенко В.С. Введение в ионометрию природных вод. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 77 с.
- Савенко В.С., Савенко А.В. Фтор в поверхностных водах острова Беринга // Водные ресурсы. 2019 (в печати).
- Сулавара К. Миграция элементов в гидросфере и атмосфере // Химия земной коры. Т. 2. М.: Изд-во АН СССР, 1964. С. 469–478.

Поступила в редакцию 21.10.2018
После доработки 12.03.2019
Принята к публикации 15.04.2019

A.V. Savenko¹, V.S. Savenko², A.N. Ivanov³FLUORINE IN WATER BODIES OF THE MATUA ISLAND
(THE CENTRAL KURILES)

The first data on fluorine content in surface (streams, lakes) and ground (springs) waters of the Matua Island were obtained. The fluorine concentration is from 9.2 to 307 mg F/l, averaging ~95 mg F/l, which corresponds to the average value for World Rivers, but is 1.5–2 times lower than the average fluorine content in river waters of Japan and Kamchatka. It was concluded that the main sources of fluorine on the island are cyclic sea salts, soluble weathering products and volcanic exhalations, which play an important role even during the period of low volcanic activity before next eruption of the Sarychev Peak volcano.

Key words: Kuriles, Matua island, surface waters, ground waters, fluorine

Acknowledgements. The study was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research (project № 18-05-01133) and the Russian Geographic Society (grant № 02/2017-R).

REFERENCES

- Degterev A.V.* Petrohimicheskie osobennosti produktov sovremennykh izverzhenij vulkana Pik Sarycheva, ostrov Matua (Kurily) [Petrochemical features of modern eruptions products of Sarychev Peak volcano, the Matua Island (the Kuriles)] // Vestn. DVO RAN. 2011. № 6. P. 94–99. (In Russian)
- Degterev A.V., Rybin A.V., Razzhigaeva N.G.* Istoricheskie izverzheniya vulkana Pik Sarycheva (o. Matua, Kuril'skie ostrova) [Historical eruptions of the Sarychev Peak volcano (Matua Island, Kuril Islands)] // Vestn. KRAUNC. Nauki o Zemle. 2011. № 1. P. 102–119. (In Russian)
- Gordeev V.V.* Geohimiya sistemy reka–more [Geochemistry of the river–sea system]. M., 2012. 452 p. (In Russian)
- Ivanov A.N.* Ostrov Matua: aktivnyj vulkan i voennaya baza [Matua Island: active volcano and military base] // Priroda. 2017. № 2. P. 18–26. (In Russian)
- Komarova N.V., Kamencev Ya.S.* Prakticheskoe rukovodstvo po ispol'zovaniyu sistem kapillyarnogo elektroforeza «KAPEL'» [Practical guidance on the use of capillary electrophoresis systems «KAPEL'»]. SPb.: Veda, 2006. 212 p. (In Russian)
- Konovalov G.S., Koreneva V.I.* Vynos mikroelementov rechnym stokom s territorii SSSR v morya v sovremennyj period [The removal of trace elements by river runoff from territory of the USSR to seas in the modern period] // Gidrohimiya. 1979. T. 75. P. 11–21. (In Russian)
- Lur'e Yu.Yu.* Unificirovannye metody analiza vod [Unified methods of water analysis]. M.: Himiya, 1971. 375 p. (In Russian)
- Petrenchuk O.P.* Eksperimental'nye issledovaniya atmosfernogo aerizolya [Experimental studies of the atmospheric aerosol]. L.: Gidrometeoizdat, 1979. 264 p. (In Russian)
- Savenko V.S.* Vvedenie v ionometriyu prirodnykh vod [Introduction to the ionometry of natural waters]. L.: Gidrometeoizdat, 1986. 77 p. (In Russian)
- Savenko V.S., Savenko A.V.* Ftor v poverhnostnykh vodah ostrova Beringa [Fluorine in surface waters of the Bering Island] // Vodnye resursy. 2019 (in print). (In Russian)
- Sugavara K.* Migratsiya elementov v gidrosfere i atmosfere [Migration of elements in the hydrosphere and atmosphere] // Himiya zemnoj kory. T. 2. M.: Izd-vo AN SSSR, 1964. P. 469–478. (In Russian)

Received 21.10.2018

Revised 12.03.2019

Accepted 15.04.2019

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geology, Department of Geochemistry, Senior Scientific Researcher, PhD. in Geography; e-mail: alla_savenko@rambler.ru

² Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Land Hydrology, Leading Scientific Researcher, Professor, D.Sc. in Geology and Mineralogy; e-mail: alla_savenko@rambler.ru

³ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Physical Geography and Landscape Science, Associate Professor, PhD. in Geography; e-mail: a.n.ivanov@mail.ru