

О СОДЕРЖАНИИ ФТОРА В ВОДАХ ОЗЕРА ИССЫК-КУЛЬ

© 2022 г. А. В. Савенко^а, *, В. С. Савенко^а

^аМосковский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
Москва, 119991 Россия

*e-mail: Alla_Savenko@rambler.ru

Поступила в редакцию 23.06.2021 г.

После доработки 18.10.2021 г.

Принята к публикации 18.11.2021 г.

Определено содержание фтора в водах оз. Иссык-Куль, которое меняется в пределах 1.79–2.75 мг/л при среднем значении 2.3 мг/л. В бессточных водоемах доля фтора в солевом остатке вод и соотношение $[F^-]/[Cl^-]$ снижаются с ростом минерализации. Это объясняется возрастанием интенсивности накопления фтора в донных отложениях по мере осолонения водоемов.

Ключевые слова: фтор, гидрохимия, озеро Иссык-Куль.

DOI: 10.31857/S0321059622060165

Повышенные концентрации фтора в донных отложениях морских и континентальных водоемов указывают на протекание процесса осадкообразования в условиях аридного климата [11], однако широкому использованию фтора для палеоклиматических реконструкций препятствует недостаточное знание механизмов процессов, контролирующих его содержание в водоемах разных типов. В частности, одной из малоизученных сторон гидрохимии фтора остается механизм его накопления в крупных бессточных водоемах, таких как Каспийское и Аральское моря, где концентрации этого элемента примерно на порядок превышают содержание в притоках [6, 9, 13]. Источниками фтора могут быть, с одной стороны, реликтовые воды древнего, частично высохшего эпиконтинентального моря, а с другой – пресные воды речного стока, минерализация которых значительно возрастает в результате испарения. Соотношение вкладов этих источников, изменявшееся на протяжении всей истории существования водоемов, количественно оценить крайне сложно. Поэтому несомненный интерес представляют данные о содержании фтора в крупных бессточных озерах, расположенных на территориях с аридным климатом и никогда не взаимодействовавших с Мировым океаном. К таким водным объектам относится оз. Иссык-Куль – одно из крупнейших бессточных озер мира, в ко-

тором основным источником солей служит речной и подземный сток.

Цель настоящей работы состояла в определении содержания фтора в водах оз. Иссык-Куль, а также в выявлении общих черт и различий по этому показателю с водами других крупных бессточных озер, имевших или не имевших в своей истории связь с водами Мирового океана.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

В июне 2015 г. сотрудником ИО РАН П.Н. Маккавеевым по просьбе авторов статьи были взяты пробы воды, местоположение станций отбора которых показано на рис. 1. В отфильтрованных пробах измеряли концентрацию растворенных фторидов методом прямой потенциометрии в присутствии ацетатного солевого буфера [12] с калибровкой фторидного ионоселективного электрода на искусственном растворе, имитирующем состав вод оз. Иссык-Куль. Также в фильтрате определяли содержание компонентов основного солевого состава (Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-}) методом капиллярного электрофореза [5] и величину общей щелочности $Alk \approx HCO_3^-$ объемным ацидиметрическим методом [8]. Погрешность измерений концентрации фтора составила $\pm 2\%$, содержания главных ионов – $\pm 3\%$.

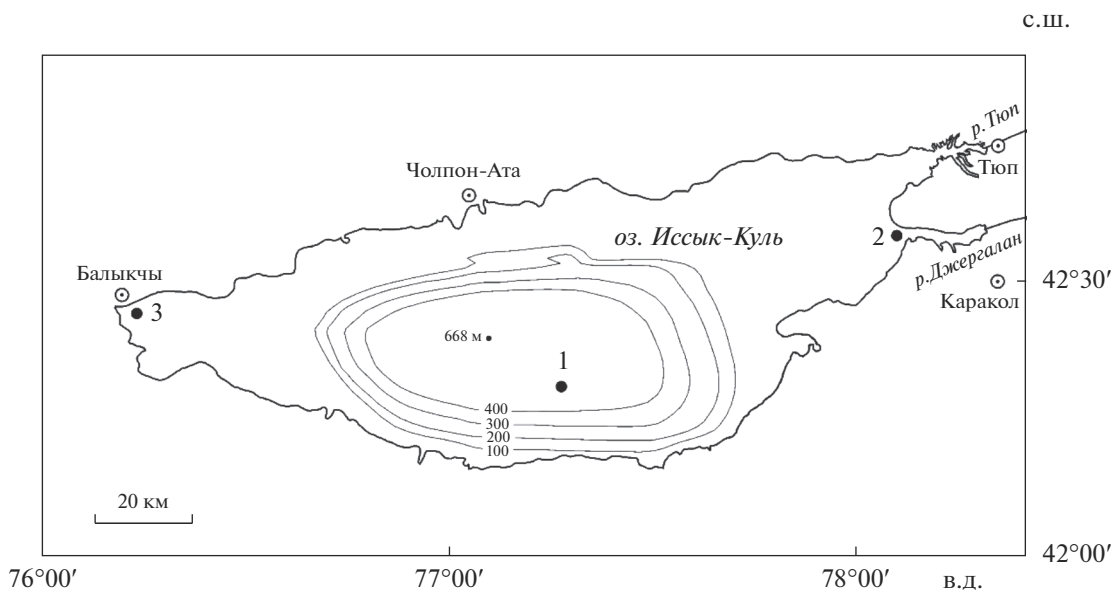


Рис. 1. Расположение станций отбора проб воды в оз. Иссык-Куль в июне 2015 г.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Несмотря на достаточно хорошую гидрохимическую изученность оз. Иссык-Куль [1, 2], имеющаяся информация по содержанию микроэлементов, в том числе фтора, весьма ограничена. Приведенное в [4] единственное известное авторам статьи содержание фтора в воде озера – 2.2 ± 0.2 мкг/л – явно не соответствует действительности и, скорее всего, содержит ошибку в размерности: вероятно, следует читать не мкг/л, а мг/л. На это указывают два факта. Во-первых, концентрация фтора в притоках оз. Иссык-Куль находится в диапазоне 0.15–0.60 мг/л [3]. Во-вторых, в соленых озерах на южном берегу оз. Иссык-Куль, образовавшихся при снижении уровня воды и представляющих собой затопленные участки бывших заливов, концентрация фтора составляет 22.0–23.5 мг/л при минерализации всего на 34–40% выше таковой в самом озере [14].

Согласно результатам измерений, представленным в табл. 1, содержание фтора в водах оз. Иссык-Куль изменяется в пределах 1.79–2.75 мг/л, составляя в среднем 2.3 мг/л при стандартном отклонении 0.4 мг/л и равенстве среднеарифметического и среднегеометрического значений. Это согласуется с данными [4] после соответствующей корректировки размерности. Изменчивость концентрации фтора существенно превышает погрешность измерений и, по-видимому, является следствием химической неоднородности вод озера.

Предположение о присутствии в оз. Иссык-Куль различных по химическому составу и физическим свойствам водных масс подтверждается результатами детальных гидрофизических исследований П.О. Завьялова с коллегами [15], которые, в частности, установили связь максимума солености в промежуточных слоях водной толщи с опусканием по склону до изопикнического уровня формирующихся осенью холодных, плотных и более пресных вод восточного шельфа. Этот процесс объясняет наблюдавшийся на глубине 400 м на ст. 1 максимум солености и ее слабое уменьшение ко дну. Небольшое снижение концентрации фтора на ст. 2 в придонном слое (глубина 5 м), по-видимому, обусловлено разгрузкой менее минерализованных подземных вод вблизи устья р. Джергалан, возможность которой отмечалась в [2]. Поскольку изучение пространственно-временной изменчивости состава вод не входило в задачи настоящей работы, здесь лишь констатируется факт пространственной неоднородности распределения фтора в водной толще озера.

В морской воде при минерализации ~ 35 г/л концентрация фтора составляет 1.3 мг/л [10], что указывает на значительно меньшее его содержание в солевом остатке (0.0037%) по сравнению с водами оз. Иссык-Куль ($\sim 0.04\%$). Обогащение фтором относительно морской воды отмечается также в сухом остатке вод морей-озер: Аральского (0.024% [9]) и Каспийского (0.024% [13]). В во-

Таблица 1. Содержание фтора, компонентов основного солевого состава и сумма ионов (минерализация *M*) в водах оз. Иссык-Куль

№ станции, глубина	Анионы, мг/л				Катионы, мг/л				<i>M</i> , г/л
	F ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	
1, 0 м	2.46	1400	2450	342	1300	56	350	121	6.02
1, 400 м	2.13	1470	2540	340	1360	57	359	123	6.25
1, дно	2.08	1470	2520	340	1350	57	353	123	6.21
2, 0 м	2.75	1370	2420	331	1240	55	344	120	5.87
2, 5 м, дно	1.79	1290	2290	329	1170	51	327	118	5.58
3, 8 м	2.75	1350	2380	339	1260	55	354	123	5.85
Среднее	2.3	1390	2430	337	1280	55	348	121	5.96
Стандартное отклонение	0.4	70	90	5	70	2	11	2	0.25

сточной части оз. Балхаш, где воды обладают наименьшей минерализацией, содержание фтора в сухом остатке достигает 0.097%, тогда как в более минерализованных водах западной части озера доля фтора снижается до 0.072% [7].

Нелинейная зависимость содержания фтора в солевом остатке от минерализации (рис. 2а) отражает общую закономерность накопления фтора в крупных водных объектах областей внутреннего стока: в процессе осолонения водоемов накопление фтора происходит медленнее увеличения общей минерализации. Аналогичная нелинейная связь наблюдается между минерализацией и соотношением концентраций фтора и хлоридов (рис. 2б). Это свидетельствует о более интенсивном переходе фтора из водной толщи в донные отложения по сравнению с компонентами основного солевого состава. С данным процессом, по-видимому, связано установленное А.Б. Роновым с соавторами [11] обогащение фтором осадочных

пород, отлагавшихся в эпиконтинентальных морях прошлых геологических эпох в условиях аридного климата.

ВЫВОДЫ

Концентрация фтора в водах оз. Иссык-Куль сравнима с его концентрацией в водах других крупных бессточных водоемов аридных территорий (Арал, Каспий, Балхаш) и составляет в среднем 2.3 мг/л при диапазоне значений 1.79–2.75 мг/л.

Подобно другим крупным водным объектам областей внутреннего стока, воды озера обогащены фтором относительно морской воды (на порядок величины по содержанию в сухом остатке).

Накопление фтора в водах бессточных водоемов происходит медленнее увеличения общей минерализации и концентрации хлоридов, что, по-видимому, связано с более интенсивным переходом фтора из водной толщи в донные отло-

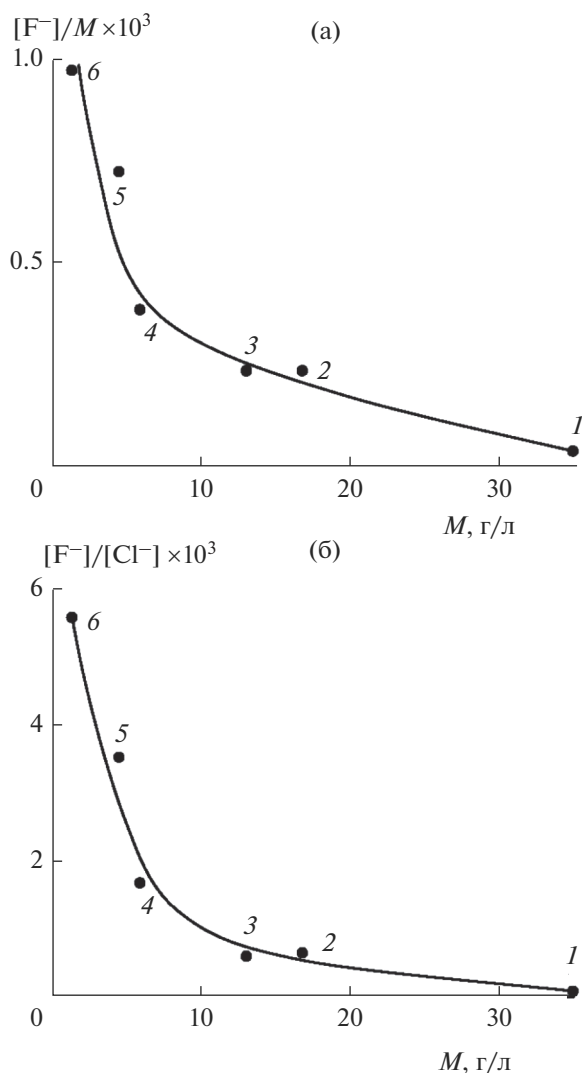


Рис. 2. Зависимость соотношений $[F^-]/M$ и $[F^-]/[Cl^-]$ от минерализации M вод океана и крупных бессточных водоемов аридных территорий. 1 – Мировой океан; 2 – Аральское море; 3 – Каспийское море; 4 – оз. Иссык-Куль; 5 – оз. Балхаш, западная часть; 6 – то же, восточная часть.

жения по сравнению с компонентами основного солевого состава.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Асанкулов Т., Абудувайли Ц., Исанова Г., Лонг М., Дуулатов Э. Многолетняя динамика и сезонные изменения гидрохимии бассейна оз. Иссык-Куль (Кыргызстан) // Арид. экосистемы. 2019. Т. 25. № 1(78). С. 79–87.
2. Кадыров В.К. Гидрохимия озера Иссык-Куль и его бассейна. Фрунзе: Илим, 1986. 212 с.
3. Кадыров В., Вибе А., Лыжина А.Д. Содержание и вынос микроэлементов с речными водами Иссык-Кульской котловины // Вопросы водного хозяйства (гидрохимия). Вып. 20. Фрунзе: Кыргызстан, 1971. С. 17–22.
4. Кадыров В., Осипова А. О содержании некоторых микроэлементов в воде озера Иссык-Куль // Микроэлементы в животноводстве и растениеводстве. Вып. 2. Фрунзе: Изд-во АН Кирг. ССР, 1964. С. 101–106.
5. Комарова Н.В., Каменцев Я.С. Практическое руководство по использованию систем капиллярного электрофореза “КАПЕЛЬ”. СПб.: Вода, 2006. 212 с.
6. Коновалов Г.С., Коренева В.И. Изменение стока растворенных веществ с речных водосборов в моря в условиях антропогенного воздействия // Геохимия природных вод. Тр. 2-го Международ. симпоз. Л.: Гидрометеиздат, 1985. С. 46–54.
7. Кренкогорский Л.Н. К характеристике концентрирования фтора в воде при зарегулировании поверхностного стока в условиях Центрального

- Казахстана // Гидрохим. материалы. 1965. Т. 39. С. 74–84.
8. *Лурье Ю.Ю.* Унифицированные методы анализа вод. М.: Химия, 1971. 375 с.
 9. *Маев Е.Г., Савенко В.С., Широкова В.А.* Фтор в водах Аральского моря // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5, География. 1984. № 3. С. 82–85.
 10. *Попов Н.И., Федоров К.Н., Орлов В.М.* Морская вода. М.: Наука, 1979. 327 с.
 11. *Ронов А.Б., Гирин Ю.П., Ермишкина А.И., Мигдусов А.А., Казаков Г.А., Марковникова М.Б.* Геохимия фтора в осадочном цикле // Геохимия. 1974. № 11. С. 1587–1612.
 12. *Савенко В.С.* Введение в ионометрию природных вод. Л.: Гидрометеоздат, 1986. 77 с.
 13. *Савенко В.С.* Фтор в водах Каспийского моря // Каспийское море: структура и динамика вод. М.: ГКНТ АН СССР, 1990. С. 156–159.
 14. *Тыныбеков А.К., Алиев М.С.* Малые озера Иссык-Кульского региона // Вестн. КРСУ. 2010. Т. 10. № 4. С. 164–167.
 15. *Zavialov P.O., Izhitskiy A.S., Kirillin G.B., Khan V.M., Konovalov B.V., Makkaveev P.N., Pelevin V.V., Rimskiy-Korsakov N.A., Alymkulov S.A., Zhumaliev K.M.* New profiling and mooring records help to assess variability of Lake Issyk-Kul and reveal unknown features of its thermohaline structure // Hydrol. Earth Syst. Sci. 2018. V. 22. № 12. P. 6279–6295.