

Химический состав бурых водорослей в прибрежных ландшафтах с активным вулканизмом (о. Парамушир, Северные Курилы)

Климова А.В.¹, Позолотина Л.А.^{1,2}, Мартыненко Д.О.^{1,2}, Сергеева А.В.²

Chemical composition of brown algae in coastal landscapes with active volcanism (Paramushir Island, Northern Kuril Islands)

Klimova A.V., Pozolotina L.A., Martynenko D.O., Sergeeva A.V.

¹ Камчатский государственный технический университет, г. Петропавловск-Камчатский;

e-mail: annaklimovae@mail.ru

² Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский

Приведены данные о содержании микроэлементов и редкоземельных элементов в фукусовых и ламинариевых водорослях о. Парамушир (Северные Курилы) и Авачинского залива (юго-восточная Камчатка). Максимальное содержание большинства проанализированных элементов в бурых водорослях определено в зоне выноса ультракислых вод реки Юрьева о. Парамушир.

Введение. Остров Парамушир относится к вулканогенной геохимической провинции. В силу активного вулканизма и гидротермальных проявлений, эта территория характеризуется специфическим набором химических элементов и процессов [1, 4]. Северная часть острова подвержена воздействию регулярных пепловых выбросов вулкана Эбеко и характеризуется наличием множественных выходов кислых и ультракислых вод с высокой минерализацией. Кислые воды обладают повышенным потенциалом к выщелачиванию ряда элементов, в том числе тяжелых металлов, из вмещающих пород. В подобных условиях из-за поверхностного и речного стоков формируются мощные зоны выноса вод, обогащенных микроэлементами, в прибрежную зону, что неизбежно оказывает влияние на химический состав морских организмов. Закономерности распределения химических элементов в живых объектах являются ценным геохимическим индикатором состояния окружающей среды. К наиболее массовым и широко распространенным видам в прибрежных экосистемах дальневосточных морей относятся бурые водоросли порядков *Fucales* и *Laminariales*. Однако, вопросы общего биогеохимического фона доминирующих видов водорослей, произрастающих в барьерной зоне «река–море» о. Парамушир, в настоящее время остаются слабо изученными. Поэтому целью нашего исследования являлось изучение химического состава бурых водорослей северной части о. Парамушир, произрастающих в зоне выноса ультракислых вод и терригенного стока с площадей, покрытых свежим вулканическим пеплом.

Материалы и методы. Сбор материалов для исследования проводили в прибрежной зоне северной части о. Парамушир (Северные Курильские острова) и Авачинского залива (юго-восточная Камчатка) в 2025 г. (рис. 1). При этом в пределах острова выделили три района, отличающихся доминирующими источниками поступления микроэлементов в окружающую среду (рис. 1А): ст. 1 – устьевая зона р. Юрьева (рис. 1Е) с ультракислыми водами (рис. 1С, D), ст. 2 – скала Тур и мыс Опорный (рис. 1F), расположенные в зоне воздействия природных (водосборный бассейн р. Матросская, включающий выходы гидротермальных вод и терригенный сток с обширной площади пепловыпадения вулкана Эбеко) и антропогенных факторов (хозяйственная деятельность г. Северо-Курильск) и ст. 3 – мыс Средний, находящийся вне зоны влияния пеплопадов, гидротермальных источников и хозяйственной деятельности. В Авачинском заливе образцы собирали в зоне смешения внутренних вод Авачинской губы и океанических вод залива в бухтах Завойко, Малая Лагерная и Шлюпочная (рис. 1В). Объектами для исследования послужили бурые водоросли порядков *Fucales* (*Fucus distichus*) и *Laminariales* (*Alaria esculenta*, *Hedophyllum bongardianum*), доминирующие в литоральных и сублиторальных сообществах макрофитов в прикамчатских водах.

Содержание химических элементов в пробах водорослей определяли в Центре коллективного пользования «Камчатский центр элементного, минерального, изотопного анализа» ИВиС ДВО РАН (определение Hg), в Секторе коллективного использования научного оборудования КамчатГТУ (определение Sr, Zn, Cu, Ni, Pb, Co, Mo, Cd, Cr, Ba) и в Приморском центре локального элементного и изотопного анализа ДВГИ ДВО РАН (определение Li, Be, V, Ga, As, Rb, Ag, Sn, Cs, Tl, Bi, Th, U и редкоземельных элементов (РЗЭ)). Значения содержания элементов в образцах приведены в мг/кг сухой массы.

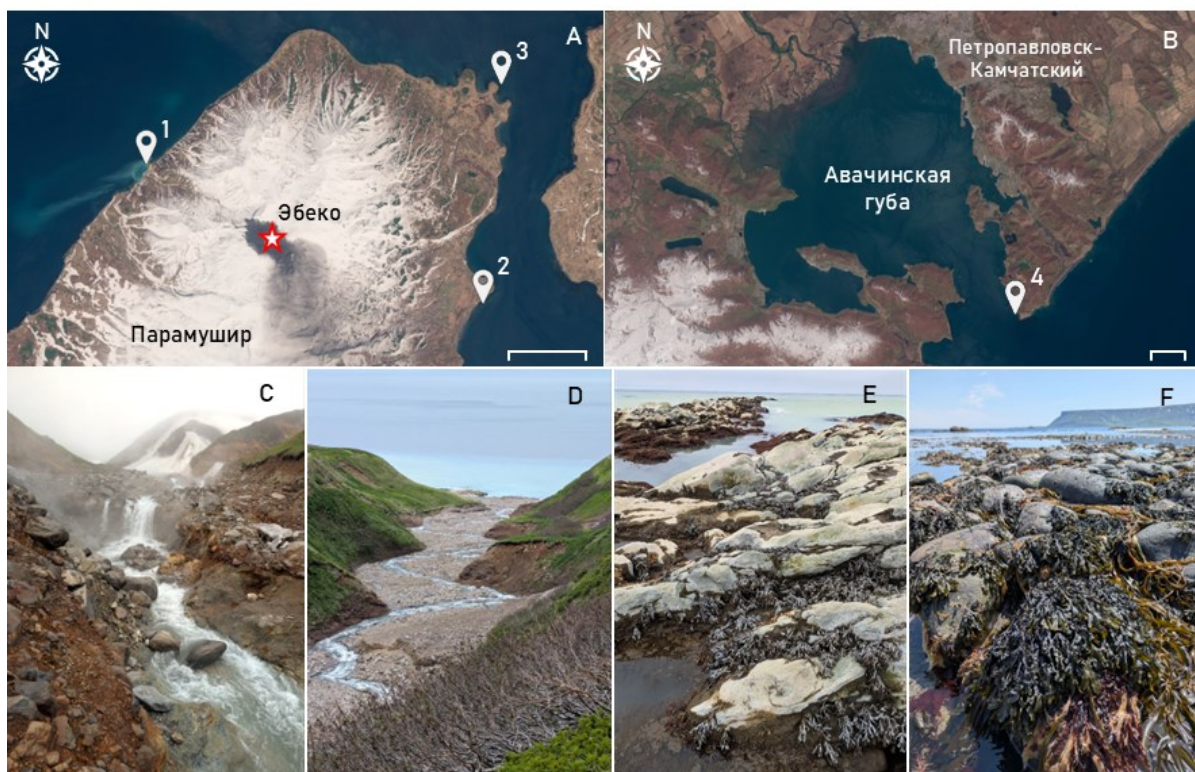


Рис. 1. Район исследования в северной части о. Парамушир и Авачинской губе в 2025 г. А – о. Парамушир, станции отбора водорослей ст. 1-3 (снимок 03.05.2025 г.). В – Авачинская губа, ст. 4 (снимок 26.05.2025 г.). С – верховье р. Юрьева, 12.05.2025 г. D – устьевая зона р. Юрьева, 12.05.2025 г. E – литораль вблизи устья р. Юрьева, 12.05.2025 г. F – литораль у мыса Опорный с куртинами водорослей *Fucus distichus*, 16.05.2025 г. Масштаб: А, В – 3 км.

Результаты и обсуждение. Усредненные уровни содержания элементов в собранных образцах бурых водорослей для каждого района приведены в таблице. К приоритетным элементам в водорослях Парамушира и Камчатки относились As, U, Cd и Sr, к дефицитным – Zn, Li и Be. Подобное распределение элементов согласуется с биогеохимическими особенностями бурых водорослей [2]. Максимальные уровни содержания элементов были выявлены для образцов, собранных в устьевой зоне р. Юрьева (ст. 1). При этом в образце *Fucus distichus*, собранном в 1 км от устья реки, суммарное содержание элементов было значительно ниже, чем вблизи устья, и соответствовало таковому ст. 3. Превышение кларковых значений элементов в водорослях Парамушира, собранных в ст. 1, установлено для As, U, Sr, Cd, V, Pb, Ga, Rb, Cu, Ba, Co, Mo, Ni, Cr, в ст. 2 – для As, U, Cd, Sr, Co, Ni, Rb, V, Ag, Cu, в ст. 3 – для As, U, Sr, Cd, Rb и в водах Авачинской губы (ст. 4) – для As, U, Cd, Sr, Co, Ni, Rb, Cs, Cr, Ba. В водорослях ст. 1 определены повышенные концентрации тяжелых металлов (Cu, Zn, Mo, Pb) и РЗЭ относительно других станций острова и Авачинского залива.

Таблица. Концентрация микроэлементов (мкг/г) в бурых водорослях о. Парамушир (Северные Курильские острова), Авачинского залива (юго-восточная Камчатка) и Архипелага Новая Земля (Карское море)

Элемент, мг/кг	Парамушир, Северные Курильские острова			Авачинский залив, Камчатка	Архипелаг Новая Земля, Карское море [2]	
	устье р. Юрьева (n=4)	мыс Опорный (n=5)	мыс Средний (n=4)	Авачинская губа (n=5)	<i>Laminaria digitata</i> (n=3)	<i>Fucus distichus</i> (n=3)
микроэлементы						
Li	0.48 ±0.32	0.46±0.44	0.37±0.25	0.33±0.49	0.45±0.12	0.52±0.12
Be	0.04 ±0.07	0.01±0.03	<п/о	<п/о	<п/о	0.02±0.01
V	15.98 ±11.54	2.55±3.70	0.35±0.13	0.84±0.57	<п/о	<п/о
Cr	1.00±0.68	0.74±0.84	0.88±1.43	1.37 ±1.82	<п/о	1.22±0.16
Co	0.24±0.29	1.29 ±1.28	0.03±0.03	1.00±0.87	1.16±0.95	3.33±1.12
Ni	0.55±0.85	1.98±2.30	0.37±0.46	2.45 ±2.11	1.15±0.63	7.43±2.39
Cu	4.74 ±2.78	2.80±2.40	0.38±0.68	2.00±1.79	3.93	7.08±1.9
Zn	14.33 ±9.63	11.76±16.00	3.85±7.70	13.56±9.25	59.3±21.2	100.8±44.7
Ga	0.05±0.06	<п/о	<п/о	<п/о	<п/о	0.12±0.02
As	28.80±9.11	28.90±16.86	33.10 ±20.30	29.46±2.35	101.2±17.1	49.1±12.54
Rb	25.50 ±11.48	16.54±4.52	22.70±12.44	23.97±18.59	28.51±7.21	21.61±6.25
Sr	820 ±180	613±157	563.5±185	611.2±58.2	785±344	1307±56
Mo	1.13 ±0.60	0.28±0.05	0.25±0.09	0.28±0.03	0.31±0.14	0.46±0.12
Ag	<п/о	0.02±0.02	<п/о	<п/о	0.71±0.44	0.12±0.02
Cd	1.08±1.28	2.61 ±1.56	1.19±0.80	1.90±1.60	1.14±0.73	0.51±0.1
Sn	<п/о	0.01±0.01	<п/о	<п/о	<п/о	<п/о
Cs	<п/о	0.02±0.03	<п/о	0.14 ±0.32	0.05±0.01	0.07±0.001
Ba	13.48 ±4.02	9.34±2.85	7.88±2.91	10.90±1.94	12.25±5.2	43.5±24.9
Tl	0.02 ±0.01	<п/о	0.01±0.01		0.010±0.008	0.009±0.001
Pb	10.33 ±7.06	0.16±0.09	0.05±0.01	0.15±0.21	1.38±1.11	0.78±0.33
Bi	<п/о	<п/о	<п/о	<п/о	<п/о	<п/о
Hg	<п/о	0.22	<п/о	1.0	0.018	0.015±0.004
Th	0.07±0.07	<п/о	<п/о	<п/о	<п/о	<п/о
U	1.53 ±1.08	0.60±0.20	0.45±0.19	0.82±0.43	0.18±0.08	<п/о
∑	939.33	693.09	635.35	700.37	1435	2770
редкоземельные элементы						
Sc	2.18 ±1.52	0.01±0.02	<п/о	0.01±0.014	0.45±0.12	<п/о
Y	3.42 ±2.26	0.28±0.27	0.05±0.032	0.07±0.049	<п/о	0.295±0.022
La	1.58 ±1.04	0.17±0.17	0.03±0.018	0.02±0.022	0.098±0.053	1.146±0.139
Ce	5.21 ±3.45	0.30±0.30	0.04±0.016	0.04±0.015	0.162±0.081	0.788±0.201
Pr	0.78 ±0.52	0.04±0.05	<п/о	<п/о	0.886±0.736	1.214±0.263
Nd	3.88 ±2.57	0.22±0.21	0.02±0.017	0.03±0.027	0.028±0.016	0.202±0.056
Sm	1.00 ±0.67	0.04±0.04	<п/о	<п/о	0.129±0.074	0.905±0.225
Eu	0.31 ±0.20	0.01±0.01	<п/о	<п/о	0.023±0.015	0.217±0.041
Gd	0.90 ±0.60	0.04±0.05	<п/о	<п/о	<п/о	0.062±0.008
Tb	0.16 ±0.11	0.01±0.01	<п/о	<п/о	0.025±0.015	0.259±0.049
Dy	0.78 ±0.52	0.04±0.04	<п/о	0.01±0.012	<п/о	0.038±0.005
Ho	0.16 ±0.11	0.005±0.009	<п/о	<п/о	0.020±0.013	0.205±0.028
Er	0.48 ±0.32	0.02±0.03	<п/о	<п/о	<п/о	0.039±0.005
Tm	0.07±0.05	<п/о	<п/о	<п/о	<п/о	0.115±0.009
Yb	0.42 ±0.29	0.02±0.02	<п/о	<п/о	<п/о	0.013±0.002
Lu	0.07±0.04	<п/о	<п/о	<п/о	<п/о	0.097±0.002
∑	21.38	1.20	0.13	0.18	1.42	5.61

Примечание. Максимальные значения элементов в проанализированных образцах выделены полужирным шрифтом.

Содержание РЗЭ в водорослях существенно отличалось между исследованными районами (табл., рис. 2). Так, спектры РЗЭ в водорослях, собранных вблизи устья р. Юрьева, имели схожий характер накопления с составом РЗЭ Верхне-Юрьевских термальных источников № 1 и № 2 (рис. 2А) [1]. Для остальных станций о. Парамушир и Авачинской губы уровни накопления РЗЭ в образцах были значительно ниже, чем в ст. 1 (рис. 2С, Е, F), и соотносились с уровнями для водорослей из Карского и Баренцева морей (рис. 2D) [2, 3].

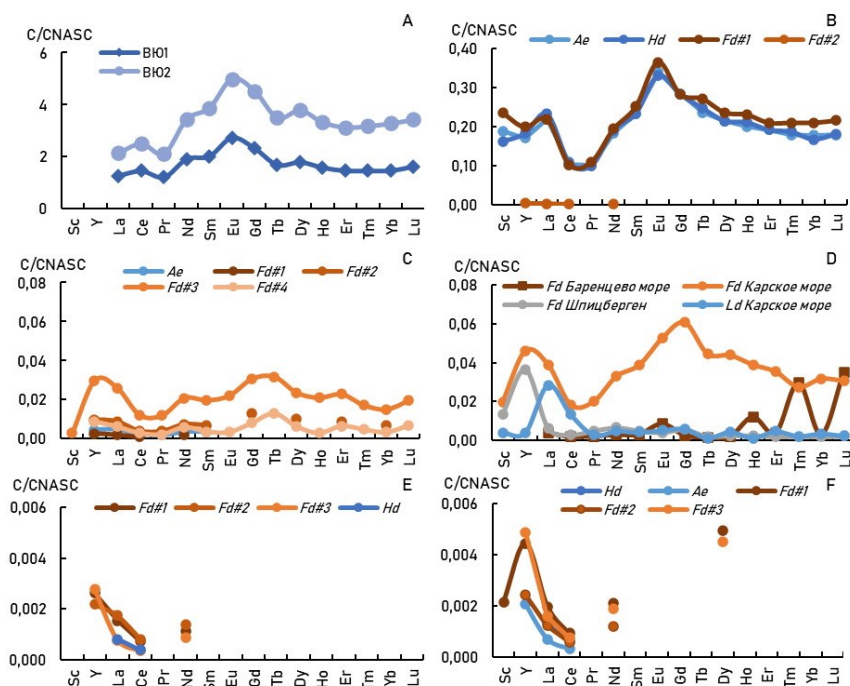


Рис. 2. Спектры редкоземельных элементов в воде Верхне-Юрьевских термальных источников (А) и бурых водорослях, собранных в различных районах:

В – устье р. Юрьева (ст. 1), С – мыс Опорный (ст. 2), D – Карское и Баренцево моря, Е – мыс Средний (ст. 3), F – Авачинский залив (ст. 4).

Обозначения водорослей: Ae – *Alaria esculenta*, Hd – *Hedophyllum bongardianum*, Ld – *Laminaria digitata*, Fd – *Fucus distichus*.

Заключение. Проведенное исследование северной части о. Парамушир выявило наличие геохимических аномалий в районах произрастания фукусовых и ламинариевых водорослей. В водорослях Авачинской губы определено повышенное содержание тяжелых металлов Cr, Co, Ni, Zn и Cd, что, вероятно, обусловлено хозяйственной деятельностью Авачинской агломерации и активным судоходством в акватории залива. Дальнейшие исследования позволят оценить барьерную функцию макрофитов и их вклад в биогенную миграцию элементов в данном регионе.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-24-20135, <https://rscf.ru/project/25-24-20135/> и в рамках темы НИР ИВиС ДВО РАН FWME-2024-0014, регистрационный номер 124072500001-6.

Список литературы

1. Калачева Е.Г., Волошина Е.В. Геохимическая характеристика термальных источников привершинной части вулкана Эбеко (о. Парамушир, Курильские острова) // Вестник КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле. 2022. Вып. 54. № 2. С. 6-19.
2. Лобус Н.В., Удалов А.А. Химический состав бурых водорослей *Laminaria digitata* (Hudson) J.V. Lamouroux, 1813 и *Fucus distichus* (Linnaeus, 1767) из заливов архипелага Новая Земля (Карское море) // Биология моря. 2021. Т. 47. № 5. С. 359-364.
3. Панова Е.Г., Воскобойников Г.М., Матишов Г.Г. Редкоземельные элементы в фукусовых водорослях Баренцева моря // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2024. Т. 515. № 1. С. 144-149.
4. Belousov A., Belousova M., Kotenko T. et al. Mechanism of the historical and the ongoing Vulcanian eruptions of Ebeko volcano, Northern Kuriles // Bulletin of Volcanology. 2021. V. 83. No. 1. Art. 4. <https://doi.org/10.1007/s00445-020-01426-z>