

УДК 581.192:582.71

DOI: 10.15372/ChUR2021272

Особенности накопления химических элементов в растениях *Potentilla anserina* L. в зоне влияния Кучигерских гидротерм

Л. В. АФАНАСЬЕВА, Т. А. АЮШИНА, Ю. А. РУПЫШЕВ, В. Л. УБУГУНОВ, В. И. УБУГУНОВА

Институт общей и экспериментальной биологии СО РАН,
Улан-Удэ (Россия)

E-mail: afanl@mail.ru

(Поступила 24.06.20; после доработки 30.08.20)

Аннотация

Территории с выходами на поверхность термальных источников являются уникальным объектом для исследований изменения минерального состава растительности и почв в условиях сильного воздействия эндогенных факторов. Изучены особенности накопления 25 химических элементов в растениях *Potentilla anserina* L. в зоне влияния Кучигерских гидротерм (Баргузинская котловина, Республика Бурятия). Установлено, что на обследованной территории концентрация Ca, K, Mg, P, S, Zn в растениях *P. anserina* варьировала незначительно. В зоне субаквальной разгрузки термальных вод растения накапливали больше Na, Sr, Li (вблизи выхода высокотемпературных грифонов) и W, Mo (вблизи выхода низкотемпературных грифонов). На прибрежном диапировом валу, где обнаружена чрезвычайно высокая активность восхождения газогидротермальных грязевых флюидов, концентрации Al, Mn, Ti, Cr, Ni, Co, La, Y в растениях были максимальны. В золе растений на всех ключевых участках отмечается превышение кларковых значений по следующим элементам: Ca (коэффициент концентрации (K_k) = 2.0–3.6), Na (K_k = 2.4–4.8), Sr (K_k = 3.5–9.5), Ba (K_k = 2.7–6.6), Li (K_k = 6.0–17.0), W (K_k = 25.0–47.0), Sc (K_k = 6.0–21.0). К химическим элементам, энергично потребляемым растениями, относятся P и S (коэффициент биологического поглощения (КБП) = 22.4–69.2); к элементам сильного накопления – Ca, Na, K, Mg, Mn, Sr, Zn, Cu, Li, Ni, Mo (КБП = 1.5–10.5). Остальные элементы относятся к группе слабого накопления и среднего захвата (КБП = 0.1–0.9). Изменение интенсивности накопления элементов растениями в зависимости от условий произрастания приводит к нарушению соотношений Fe/Mn, Fe/Zn, Cu/Mo, Ca/Sr, Ca/Ba, K/Ba, Sr/Ba.

Ключевые слова: *Potentilla anserina* L., элементный химический состав, Кучигерские источники

ВВЕДЕНИЕ

Изучению территорий с выходами на поверхность гидротермальных источников уделяется особое внимание. С одной стороны, они представляют большой интерес для определения бальнеологического и курортно-рекреационного потенциала в условиях устойчивого развития регионов и рационального использования природных ресурсов [1], с другой стороны, эти территории служат уникальным объектом

для исследования изменений химического состава растительности и почв.

Байкальская рифтовая зона – одна из крупнейших действующих гидротермальных систем в континентальных блоках земной коры. К важному признаку проявления современных рифтогенных процессов в ней относится присутствие более 600 очагов разгрузки минеральных источников, различных по химическому составу, температуре и бальнеологическим свойствам [2–4]. При этом разгружающиеся воды

оказывают существенное влияние на формирование ландшафтов [5, 6].

Большое количество выходов термальных вод сосредоточено на пересечении Баргузинского и Дыренского разломов в северо-восточной части рифтовой зоны (северо-западный участок Баргузинской впадины) [7]. Один из результатов проявления эндогенеза на этой территории – широкое распространение галоморфных экосистем в лесостепной зоне в условиях отсутствия соледержащих коренных и осадочных пород. Кроме того, экзогенный механизм формирования микро- и нанорельефа, характерный для пойм, заменяется диапировым, возникающим вследствие давления восходящих газогидротермальных флюидов из сейсмически активных глубинных разломов [8, 9]. В почвах отмечается своеобразие морфологического строения [10], минералогического состава и физико-химических свойств [11]. Поступление значительного количества натрия, серы, бария, стронция и редкоземельных элементов в почвы гидротермальных полей определяет их геохимические особенности [12].

Сложное сочетание экзо- и эндогенных факторов формирования ландшафтов этой территории, а также отсутствие каких-либо данных о биогеохимической миграции элементов в основных компонентах ландшафта предопределило актуальность исследований по выявлению закономерностей аккумуляции химических элементов растениями в различных геохимических обстановках.

Один из “сквозных” видов, произрастающий на участках с различными проявлениями газогидротермальной флюидной разгрузки в зоне влияния Кучигерских гидротерм, – *Potentilla anserina* L. [9]. Это моноподиально-розеточное, вегетативно-подвижное растение с поливариантным онтогенезом характеризуется повышенной морфологической, анатомической и физиологической пластичностью, что позволяет ему произрастать в разнообразных экологических условиях [13]. Данный вид имеет широкую экологическую амплитуду по отношению к степени увлажнения и засоления субстрата: растения часто встречаются на пойменных, суходольных, солонцеватых лугах с разной степенью заболоченности, использующихся под пастбища и сенокосы, по берегам водоемов, в разреженных лесных сообществах, на пустырях [13, 14].

Цель данной работы – изучить влияние условий произрастания на содержание макро- и микроэлементов в наземной части растений

P. anserina L. в зоне разгрузки термальных вод Кучигерского источника.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Исследования проведены на северо-востоке Баргузинской котловины возле улуса Кучигер (Кучегэр) Курумканского района Республики Бурятия, на территории, где происходит разгрузка термальных вод Кучигерского источника (рис. 1). Основные грифоны термальных вод имеют групповой выход в 25–30 м к востоку от русла ручья – притока р. Индихэн. Они используются в бальнеологических целях, поэтому над ними сооружены деревянные конструкции для принятия грязевых ванн. По химическому составу термы относятся к фтористому сероводородному гидрокарбонатно-сульфатному натриевому (кульдурскому) типу и характеризуются низкой минерализацией, высоким содержанием кремниевой кислоты, сильнощелочной реакцией (рН 9.28–9.90), термальностью (40–50 °С) [1]. В водах такого типа отмечаются высокие концентрации целого ряда микроэлементов – F, S, Si, Li, Sr, Ba [3].

Открытые грифоны расположены в болотном массиве на относительно крупном островном поднятии. В болоте и по его периферии встречается множество приподнятых участков в виде островных и полуостровных валов, имеющих диапировый генезис и сложенных выдавленным снизу органогенным и минеральным материалом. На поверхности валов в зависимости от вертикального подъема происходит смена болотной растительности на лугово-болотную, луговую или даже лугово-степную. Поверхность контактирующей с болотом аллювиальной равнины также осложнена диапировыми валами, кочками, особенно в западной части, примыкающей к берегу болота. В центральной части аллювиальной равнины имеются многочисленные неровности в виде свежих кочек, просадок в хорошо увлажненных понижениях, а также более зрелых, сильно выположенных валов на относительно сухих позициях. В растительном покрове влияние эндогенеза проявляется в резкой локальной смене ассоциаций, а также в образовании пустошей, полностью или почти полностью лишенных растительности.

Для сбора растений на исследуемой территории были заложены ключевые участки (КУ) размером 5–10 м² (см. рис. 1). Участок КУ-1 расположен на бортовой части диапирового вала, сформированного в болотном массиве в зоне субквального высачивания термальных вод. Ряд



Рис. 1. Внешний вид ландшафта, географическое положение Кучигерских гидротерм и ключевых участков (КУ) на космическом снимке (картографический сервис Google).

факторов свидетельствует о том, что этот участок являлся местом разгрузки высокотемпературного грифона, над которым были заложены лечебные бани. В настоящее время грифон не функционирует. Диапировый вал высотой около 0.5 м относительно уровня вод в болоте сформирован из достаточно рыхлого тонкодисперсного материала, на его бортах в результате недавнего поднятия поверхности образованы почвоподобные тела, состоящие из турбированных слоев исходных торфяно-глеевых и перегнойно-глеевых почв, на которых *P. anserina* образует монодоминантное сообщество. Кислотность верхнего слоя почвогрунта (0–20 см) соответствует рН 5.1, влажность – 66.1 %.

Участок КУ-2 расположен на борту диапирового вала, сформированного рядом с участком скопления мелких озер в болоте, на котором отмечаются многочисленные субаквальные разгрузки низкотемпературных вод в болоте в виде небольших озер с выраженными грифонами. Диапировый вал высотой около 1 м характеризуется большей неоднородностью почвенно-грунтового субстрата (в основном грубодисперсного) и произрастающей растительности по сравнению с КУ-1. Растение *P. anserina* L. здесь формирует монодоминантное сообщество. Кислотность верхнего слоя почвогрунта составляет рН 8.3, влажность – 30.2 %.

Участок КУ-3 расположен на бортовой части высокого (1.5–2.0 м относительно уровня вод)

прибрежного диапирового вала, прилегающего к болоту в 300–500 м ниже по течению от открытых грифонов – “бани” и участков КУ-1 и КУ-2. На валу обнаружена чрезвычайно высокая активность пучения поверхности, связанная с восхождением газогидротермальных грязевых флюидов и проявляющаяся в свежих трещинах на гребне вала, формировании инъективных диапиров с растяжением, разрывами и турбацией вмещающих слоев, а также образованием специфичных импрегнированных нефтебитумами слоев. Растение *P. anserina* здесь также формирует монодоминантные сообщества на поднятом из болота, сильно турбированном материале исходных торфяно-глеевых почв. Значение рН верхнего слоя почвогрунта – 5.7, влажность – 19.9 %.

Участок КУ-4 расположен в центральной части аллювиальной равнины в месте небольшой просадки с близким залеганием грунтовых вод, где, как мы полагаем, имеет место скрытая подпочвенная и испарительная разгрузка газогидротермальных флюидов. *P. anserina* здесь содоминирует в луговых сообществах на увлажненных сильнозасоленных турбированных почвах. Кислотность верхнего слоя почвогрунта соответствует рН 8.2, влажность – 14.1 %.

На каждом КУ методом квадрата срезали надземную часть 7–10 растений *P. anserina*. Одновременно отбирали почвенные образцы на глубине 0–20 см. В лабораторных условиях рас-

тительные и почвенные образцы высушивали до воздушно-сухого состояния, после чего измельчали и просеивали. Далее растительные образцы минерализовали в муфельной печи SNOOL 8.2/1100 L (AB UMEGA GROUP, Литва) при 450 °С в течение 3 ч, золу растворяли в 0.1 М растворе азотной кислоты. Для разложения почвенных образцов использовали смесь фтороводородной, хлорной и азотной кислот (ГОСТ ПНД Ф 16.1:2.3:3.11–98). В полученных растворах определяли содержание 25 элементов (Al, Ba, Ca, Ce, Co, Cr, Cu, Fe, K, La, Li, Mg, Mn, Mo, Na, Ni, P, S, Sc, Sr, Ti, V, W, Y, Zn) атомно-эмиссионным методом с помощью спектрометра SPECTRO ARCOS (Spectro Analytical Instruments GmbH, Германия) в аккредитованной лаборатории ГКК ГП “РАЦ” (Улан-Удэ, аттестат аккредитации № РОСС RU.0001.511112). Для контроля аналитического качества процедур использовались стандартные образцы ГСО РМ 68, ГСО 2508, ГСО 2499, ОСО 10235; относительная ошибка метода не превышала 5–10 %.

Влажность почвенных образцов определяли весовым методом, актуальную кислотность (рН) – потенциометрически в водных вытяжках при массовом соотношении почва/вода = 1 : 2.5 [15].

Для оценки аккумулирующей способности растений использовали коэффициенты биологического поглощения (КБП) – отношение концентрации элемента в золе растений к его валовой концентрации в почве. По КБП элементы были разделены на группы: 1) энергичного накопления ($100 > \text{КБП} \geq 10$); 2) сильного накопления ($10 > \text{КБП} \geq 1$); 3) слабого накопления и среднего захвата ($1 > \text{КБП} \geq 0.1$); 4) слабого захвата ($0.1 > \text{КБП} \geq 0.01$), 5) очень слабого захвата ($0.01 > \text{КБП} \geq 0.001$) [16].

Статистическую обработку результатов проводили с использованием стандартных методов [17] и пакета программ PAST v3.17. Полученные данные были проверены на нормальность (Shapiro-Wilk's test, уровень значимости (P) < 0.05) и равенство дисперсий (Levene's test); рассчитаны средние значения элементов (M) и стандартное отклонение (δ). Различия между ключевыми участками оценивали с помощью пакета several-sample tests (ANOVA), при значимом результате использовали критерий множественного сравнения (Tukey's test, $P \leq 0.05$).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для выявления особенностей накопления химических элементов в растениях *P. anserina* в

зоне влияния термальных вод Кучигерского источника проведен сравнительный анализ концентраций на КУ, построены ряды накопления элементов в убывающей последовательности (табл. 1, 2).

В надземной части *P. anserina* на всех КУ в рядах накопления зольных элементов доминирует кальций и натрий. При этом диапазон варьирования концентрации кальция в зависимости от условий произрастания был значительно меньше (коэффициент вариации (C_v) = 12 %), чем натрия (C_v = 33 %). В зоне субаквальной разгрузки термальных вод (КУ-1, КУ-2) содержание натрия в растениях возрастало в 1.6–1.9 раза по сравнению с прибрежным диапировым валом (КУ-3) и центральной частью аллювиальной равнины (КУ-4). Концентрации фосфора, магния и калия в растениях на обследованной территории изменялись в небольших пределах (C_v = 11–16 %), а их последовательность в рядах накопления была достаточно стабильной. Смещение фосфора на последнее место в этой группе элементов было отмечено только у растений на прибрежном диапировом валу. Группу макроэлементов в рядах накопления на КУ-2, КУ-3, КУ-4 замыкает сера. Несмотря на невысокий диапазон изменчивости ее концентрации (C_v = 19 %), нами наблюдалась тенденция к увеличению ее содержания в растениях при переходе от центральной части аллювиальной равнины к территории субаквальной разгрузки высокотемпературных грифонов (КУ-1), что привело к ее перемещению в ряду накопления на третье место.

Проведенные исследования выявили сложный характер изменений концентрации (n , мг/кг сухого вещества) микроэлементов в растениях. По абсолютному содержанию в надземной части растений мы условно разделили микроэлементы на четыре группы: 1) элементы высокой концентрации ($10\,000 > n > 1000$) – Al, Fe, Mn, Sr; 2) элементы средней концентрации ($1000 > n > 100$) – Ba, Zn, Ti; 3) элементы низкой концентрации ($100 > n > 10$) – Cu, Li, Cr, Ni, V; 4) элементы очень низкой концентрации ($10 > n > 0.1$) – La, Ce, Co, W, Mo, Sc, Y.

Содержание микроэлементов первой группы в растениях на обследованной территории варьировало в достаточно широких пределах (C_v = 62–71 %). При этом на прибрежном диапировом валу концентрация алюминия, стронция и марганца в растениях была в 1.4–3.2 раза выше, а железа – в 1.5 раза ниже, по сравнению с центральной частью аллювиальной равнины.

ТАБЛИЦА 1

Содержание макро- и микроэлементов в золе растений *P. anserina* ($M \pm \delta$, мг/кг) в зоне влияния Кучигерских гидротерм

Элемент	Ключевой участок				Кларк [18]
	КУ-1	КУ-2	КУ-3	КУ-4	
Макроэлементы					
Ca, 10 ⁴	9.90±0.84	11.81±0.48	9.51±0.72	12.12±0.89	3.0
Na, 10 ⁴	9.62 ^a ±0.74	8.62 ^a ±0.21	5.55 ^b ±0.42	4.76 ^b ±0.23	2.0
P, 10 ⁴	3.60±0.24	3.46±0.14	2.89±0.22	3.97±0.22	7.0
K, 10 ⁴	3.18±0.16	2.86±0.46	3.71±0.24	3.41±0.25	3.0
Mg, 10 ⁴	3.19±0.20	3.09±0.12	4.13±0.36	2.94±0.28	7.0
S, 10 ⁴	3.62±0.14	2.75±0.21	2.69±0.12	2.37±0.32	5.0
Микроэлементы					
Al	1500 ^d ±112	4500 ^c ±252	12 600 ^a ±452	8900 ^b ±356	1400
Fe	1500 ^c ±94	2800 ^b ±154	5100 ^a ±256	7600 ^a ±312	1000
Mn	2300 ^b ±148	680 ^d ±84	3700 ^a ±248	1200 ^c ±114	7500
Sr	2850 ^a ±251	1440 ^b ±116	1500 ^b ±98	1050 ^c ±100	30
Zn	585±84	560±72	756±128	491±52	900
Ba	310 ^c ±36	270 ^c ±28	510 ^b ±25	660 ^a ±58	100
Ti	100 ^d ±18	160 ^c ±24	470 ^a ±42	370 ^b ±39	1000
Li	187 ^a ±19	66.32 ^c ±9.42	119 ^b ±18	89.32 ^b ±7.56	11
Cu	55.40 ^b ±9.82	101 ^a ±12	97.84 ^a ±10.40	79.91 ^a ±6.54	200
Cr	8.91 ^c ±1.21	23.43 ^b ±2.36	36.72 ^a ±4.22	24.12 ^b ±1.42	25
Ni	13.42 ^c ±1.98	19.62 ^b ±1.84	51.51 ^a ±10.12	18.45 ^b ±1.14	50
V	1.93 ^c ±0.19	5.68 ^b ±0.48	14.31 ^a ±3.28	14.11 ^a ±1.08	61
Ce	1.92 ^c ±0.06	5.74 ^b ±0.39	9.96 ^a ±1.24	8.24 ^a ±1.12	0.1
La	2.09 ^c ±0.11	5.28 ^b ±0.12	7.91 ^a ±0.23	6.01 ^b ±0.24	0.1
Mo	8.39 ^b ±0.42	16.04 ^a ±1.26	5.69 ^c ±0.52	6.08 ^c ±0.46	20
W	5.01 ^b ±0.52	9.51 ^a ±1.18	4.88 ^b ±0.23	5.41 ^b ±0.42	0.2
Co	0.51 ^c ±0.01	0.59 ^c ±0.02	6.13 ^a ±1.12	2.04 ^b ±0.42	15
Sc	0.51 ^b ±0.01	0.64 ^b ±0.01	1.89 ^a ±0.20	1.85 ^a ±0.18	0.09
Y	0.51 ^d ±0.01	0.99 ^c ±0.02	2.55 ^a ±0.45	1.63 ^b ±0.12	1.0

Примечание. Буквы в одном ряду указывают на статистически значимые различия между ключевыми участками ($P < 0.05$), где $a > b > c > d$.

ТАБЛИЦА 2

Ряды накопления элементов в растениях *P. anserina* и в почве зоне влияния Кучигерских гидротерм

Ключевой участок	Ряд накопления	
	в растениях	в почве
КУ-1	Ca > Na > S > P > Mg > K > Sr > Mn > Al > Fe > Zn > Ba > Li > Ti > Cu > Ni > Cr > Mo > W > La > V ≥ Ce > Y ≥ Sc ≥ Co	Ca > Fe > Na > Al > S > Mg > K > P > Ti > Sr > Mn > Ba > Zn > Cu > Cr > V > W > Ce > La > Ni > Li > Mo > Sc > Y > Co
КУ-2	Ca > Na > P > Mg > K > S > Al > Fe > Sr > Mn > Zn > Ba > Ti > Cu > Li > Cr > Ni > Mo > W > V ≥ Ce > La > Y > Sc > Co	Al > Ca > Na > Fe > K > Mg > Ti > S > Ba > Sr > P > Mn > Zn > V > Ce > La > Cr > Cu > Li > Ni > W > Co > Sc > Y > Mo
КУ-3	Ca > Na > Mg > K > P > S > Al > Fe > Mn > Sr > Zn > Ba > Ti > Li > Cu > Ni > Cr > V > Ce > La > Co > Mo > W > Y > Sc	Al > Ca > Na > Fe > K > Mg > Ti > Ba > S > Sr > P > Mn > V > Zn > Ce > Cr > La > Cu > Ni > Y > Li > Sc > Co > W > Mo
КУ-4	Ca > Na > P > K > Mg > S > Al > Fe > Mn > Sr > Ba > Zn > Ti > Li > Cu > Cr > Ni > V > Ce > La > Mo > W > Co > Sc > Y	Al > Ca > Na > Fe > K > Mg > Ti > Ba > Sr > P > Mn > S > V > Zn > Ce > Cr > La > Li > Y > Ni > Cu > Sc > Co > W > Mo

На территории субаквальной разгрузки гидротерм в растениях отмечается уменьшение содержания алюминия и железа в 2.0–5.9 раза и увеличение концентрации стронция в 1.4–2.7 раза по сравнению с аллювиальной равниной, особенно в месте выхода высокотемпературных грифонов, что приводит к перераспределению этих микроэлементов в ряду накопления. Кроме того, на территории выхода низкотемпературных грифонов содержание марганца в растениях было в 3.4 раза ниже, чем при разгрузке высокотемпературных грифонов.

Среди микроэлементов второй группы относительно невысокий уровень варьирования отмечен для цинка ($C_v = 19\%$), средний – для бария ($C_v = 42\%$) и значительный – для титана ($C_v = 63\%$). Для бария и титана установлен выраженный тренд к снижению концентрации в зоне субаквальной разгрузки термальных вод: их содержание в растениях было в 2.1–3.7 раза ниже, чем на аллювиальной равнине. При этом на всех диапировых валах в рядах накопления цинк переходит на начальную позицию в этой группе.

Широкий диапазон варьирования концентрации также отмечен для микроэлементов третьей группы ($C_v = 25–69\%$). Увеличение концентрации лития в растениях на территории разгрузки высокотемпературных грифонов, а меди – на территории выхода низкотемпературных грифонов, приводит к переходу этих элементов в группу более высокого содержания. Изменение последовательности элементов в рядах накопления также обусловлены повышением содержания никеля (в 2.8 раза) в растениях на прибрежном диапировом валу, снижением концентраций ванадия (в 2.5–7.4 раза) на территории субаквальной разгрузки гидротерм и хрома (в 2.7 раза) на территории выхода высокотемпературных грифонов.

В значительной степени варьируют абсолютные значения микроэлементов с очень низкой концентрацией ($C_v = 37–114\%$), а также их положение в рядах накопления. Например, обнаружено, что растения, произрастающие на прибрежном диапировом валу, отличаются более высокими концентрациями церия, лантана, кобальта, иттрия. В зоне субаквальной разгрузки гидротерм происходит снижение содержания скандия, кобальта и церия по сравнению с аллювиальной равниной в 3.0–3.8, 3.4–4.0 и 1.4–4.3 раза соответственно. На территории разгрузки низкотемпературных грифонов расте-

ния в два раза больше аккумулируют молибден и вольфрам.

Из полученных данных следует, что растения *P. anserina* на всех изученных участках имеют близкий элементный состав по содержанию кальция, калия, магния, фосфора, серы и цинка. Растения, произрастающие в зоне влияния субаквальной разгрузки высокотемпературных вод (КУ-1), накапливают больше стронция, натрия и лития и отличаются более низким содержанием элементов III группы (алюминий, скандий, иттрий, лантан), а также железа, кобальта, бария, церия, ванадия и титана. Растения в зоне влияния низкотемпературных грифонов (КУ-2) накапливают вольфрам и молибден, а на прибрежном диапировом валу (КУ-3) – алюминий, марганец, титан, хром, никель, кобальт, лантан и иттрий.

Концентрации большинства рассмотренных химических элементов (Mg, P, S, Al, Fe, Mn, Ti, Zn, Cu, Ni, Cr, V, Mo, Y) в золе надземной части *P. anserina* были ниже кларковых значений (коэффициент концентрации (K_k) < 1), установленных для растений мира [18]. Превышение кларковых значений отмечено для Ca ($K_k = 2.0–3.6$), Na ($K_k = 2.4–4.8$), Sr ($K_k = 3.5–9.5$), Ba ($K_k = 2.7–6.6$), Li ($K_k = 6.0–17.0$), W ($K_k = 25.0–47.0$), Sc ($K_k = 6.0–21.0$). Концентрация калия находилась в пределах кларка.

Учитывая, что почва – основной источник поступления химических элементов в растения, на КУ для верхнего слоя почвогрунтов (0–20 см) также были составлены ряды накопления и проанализированы абсолютные значения валовых концентраций элементов (см. табл. 2, 3). Следует отметить, что ряды накопления элементов в почвогрунтах на КУ-2, КУ-3, КУ-4 довольно похожи, некоторые отличия наблюдаются в перемещении серы и меди в сторону большей концентрации на диапирах. Кроме того, в ряду накопления элементов, характерном для территории разгрузки низкотемпературных грифонов, в сторону большей концентрации переходят цинк, лантан, литий, никель и вольфрам.

Для почвогрунтов на участке КУ-1, находящемся в непосредственной близости от выхода высокотемпературных грифонов, ряд накопления элементов существенно отличался. Увеличение концентрации серы, вольфрама и молибдена по сравнению с почвогрунтами на аллювиальной равнине в 16.9, 5.9 и 2.1 раза соответственно приводит к перемещению этих элементов в ряду накопления в сторону большей концентрации. Кроме того, в почвогрунтах обнаружено значитель-

ТАБЛИЦА 3

Содержание макро- и микроэлементов в почве ($M \pm \delta$, мг/кг) в зоне влияния Кучигерских гидротерм

Элемент	Ключевой участок				Кларк [19]
	КУ-1	КУ-2	КУ-3	КУ-4	
Макроэлементы					
Ca, 10 ⁴	2.08 ^b ±0.22	2.46 ^b ±0.34	2.96 ^{a,b} ±0.12	3.58 ^a ±0.31	2.56
Na, 10 ⁴	0.92 ^c ±0.14	2.15 ^b ±0.11	2.62 ^a ±0.21	3.11 ^a ±0.30	2.42
P, 10 ⁴	0.07 ^b ±0.01	0.05 ^c ±0.01	0.10 ^a ±0.02	0.10 ^a ±0.02	0.07
K, 10 ⁴	0.19 ^b ±0.16	1.85 ^a ±0.46	1.81 ^a ±0.24	2.07 ^a ±0.25	2.32
Mg, 10 ⁴	0.56 ^b ±0.08	0.56 ^b ±0.08	0.71 ^{ab} ±0.06	0.99 ^a ±0.12	1.49
S, 10 ⁴	0.66 ^a ±0.10	0.12 ^b ±0.01	0.12 ^b ±0.02	0.04 ^c ±0.01	0.09
Микроэлементы					
Al	9100 ^c ±152	57 500 ^b ±344	68 400 ^{a,b} ±512	79 600 ^a ±481	76 100
Fe	9500 ^b ±119	18 700 ^a ±268	21 500 ^a ±274	24 200 ^a ±212	40 600
Mn	130 ^c ±18	260 ^b ±14	380 ^a ±28	480 ^a ±14	770
Sr	380 ^d ±21	540 ^c ±16	980 ^b ±38	1120 ^a ±150	270
Zn	30.60 ^b ±8.40	67.61 ^a ±2.27	38.86 ^b ±2.88	51.10 ^a ±3.52	75
Ba	120.00 ^b ±3.61	1150.00 ^a ±8.42	1240 ^a ±25	1390 ^a ±87	628
Ti	560 ^c ±19	1870 ^b ±74	2730 ^a ±142	3470 ^a ±309	3900
Li	8.41 ^b ±0.99	18.22 ^a ±1.42	8.31 ^b ±0.78	15.94 ^a ±0.56	32
Cu	14.92 ^b ±0.82	27.72 ^a ±1.21	18.42 ^b ±1.44	10.51 ^c ±1.84	27
Cr	14.10 ^b ±1.71	26.33 ^a ±1.36	30.81 ^a ±2.24	32.34 ^a ±1.42	92
Ni	10.54 ^b ±2.28	17.14 ^a ±1.24	13.90 ^b ±1.12	11.26 ^b ±1.10	50
V	39.25 ^b ±1.19	48.44 ^b ±4.48	64.82 ^a ±5.81	73.92 ^a ±10.08	106
Ce	11.92 ^b ±0.64	38.72 ^a ±0.34	38.12 ^a ±0.24	44.31 ^a ±0.12	70
La	11.26 ^c ±0.11	30.35 ^a ±0.14	19.69 ^b ±0.13	23.15 ^b ±0.24	32
Mo	4.27 ^a ±0.42	2.05 ^b ±0.26	2.43 ^b ±0.42	2.04 ^b ±0.56	1.1
W	29.81 ^a ±3.52	10.26 ^b ±1.80	5.73 ^c ±0.27	5.01 ^c ±0.62	2.0
Co	2.32 ^b ±0.10	6.17 ^a ±0.54	6.11 ^a ±0.12	6.45 ^a ±0.22	18
Sc	2.74 ^c ±0.71	5.65 ^b ±0.48	7.71 ^a ±0.90	9.21 ^a ±0.88	10
Y	2.71 ^c ±0.12	9.21 ^b ±0.82	12.52 ^a ±1.45	14.07 ^a ±2.26	20

Примечание. Буквы в одном ряду указывают на статистически значимые различия между ключевыми участками ($P < 0.05$), где $a > b > c > d$.

ное снижение содержания целого ряда элементов, что также приводит к их перемещению по ряду накопления. Так, содержание бария уменьшалось в 11.6 раза, алюминия – в 8.7 раза, титана – в 6.2 раза, иттрия – в 5.2 раза, церия – в 3.7 раза, натрия и скандия – в 3.4 раза, стронция – в 2.9 раза, кобальта – в 2.8 раза, железа – в 2.5 раза, хрома – в 2.3 раза, ванадия – в 1.9 раза, кальция – в 1.7 раза по сравнению с почвогрунтами на аллювиальной равнине.

Отличительная особенность слоя почвогрунтов (0–20 см) на обследованной территории – высокое содержание серы по отношению к кларку литосферы ($K_k = 2.3–7.3$) [19]. Максимальное накопление этого элемента отмечается в почвогрунтах, находящихся в зоне влияния высокотемпературных грифонов. Сера не является типоморфным элементом ландшафтов Забайкалья

и Прибайкалья, поэтому ее присутствие в почвах может свидетельствовать об эндогенном поступлении в составе растворенных солей и газов и служить своеобразным маркером разгрузки глубинных флюидов.

Наряду с серой, корнеобитаемый слой также обогащен вольфрамом ($K_k = 2.5–14.9$), молибденом ($K_k = 2.2–3.9$) и стронцием ($K_k = 1.4–4.1$). Повышенное содержание вольфрама и молибдена может быть связано с W-Mo гидротермальным оруднением, которое приурочено к зонам разломов и трещинам дробления [20]. Высокое содержание стронция характерно для палеозойских гранитов Ангаро-Витимского батолита [21].

Содержание элементов группы железа (Fe, Mn, Co, Ni), а также магния, цинка, лития, хрома, ванадия, церия, скандия и иттрия в почвогрунтах на всех КУ находилось ниже кларко-

вых значений ($K_r = 1.4-7.8$). Концентрации кальция, натрия, калия, бария были ниже кларковых значений в почвогрунтах на территории разгрузки высокотемпературных грифонов, титана – в почвогрунтах диапировых валов, алюминия – в почвогрунтах прибрежного диапира и центральной части аллювиальной равнины.

Результаты корреляционного анализа данных выявили наличие достоверных положительных линейных связей между содержанием железа, меди, лантана, серы, бария, титана, хрома, алюминия, церия, иттрия, ванадия и скандия в золе растений и в почвогрунтах (коэффициент корреляции ($r = 0.51-0.97$, $P = 0.05$). Для натрия, стронция и лития эти связи были отрицательными ($r = (-0.79)-(-0.92)$, $P = 0.05$).

Обнаружено также, что с увеличением кислотности почвенного раствора в растениях *P. anserina* повышается содержание магния, серы, цинка, лития, марганца и стронция ($r = (-0.57)-(-0.91)$, $P = 0.05$), а кальция, напротив, снижается ($r = 0.85$, $P = 0.05$). При увеличении влажности почвы в растениях возрастает содержание серы, натрия, лития и стронция ($r = 0.81-0.98$, $P = 0.05$), а концентрация меди, железа, бария, лантана, титана, хрома, алюминия, церия, кобальта, иттрия, ванадия, скандия снижается ($r = (-0.54)-(-0.91)$, $P = 0.05$).

Расчет КБП показал, что к наиболее энергично потребляемым растениями химическим элементам относятся фосфор и сера (КБП = 22.4–69.2) (табл. 4). К элементам сильного накопления в растениях *P. anserina* относятся кальций, натрий, калий, магний, марганец, стронций, цинк, медь, литий, никель и молибден (КБП = 1.5–10.5). Отмечено, что интенсивность накопления растениями меди снижается, а кальция, натрия и стронция – увеличивается на территории субаквальной разгрузки гидротерм. При этом КБП натрия и стронция увеличивались в месте выхода высокотемпературных грифонов (в 7.0–8.4 раза). Интенсивность накопления марганца, цинка и лития увеличивалась на участках КУ-1 и КУ-3, молибдена – на КУ-2, никеля – на КУ-3. Остальные элементы (Al, Fe, Ba, Ti, Cr, V, Ce, La, W, Co, Sc, Y) относятся к группе слабого накопления и среднего захвата (КБП = 0.1–0.9).

Изменение интенсивности накопления элементов растениями из почвогрунтов приводит не только к различиям в абсолютном содержании элементов в растениях, но и к нарушениям соотношений между ними. Соотношение концентраций элементов, особенно физиологически

необходимых, является важным критерием для оценки разбалансированности элементного состава растений [22]. Известно, что Fe и Mn взаимосвязаны в метаболических процессах растений, а от их соотношения зависит эффективность процесса фотосинтеза. Согласно разным данным [23, 24], в естественных условиях физиологическая норма Fe/Mn варьирует в пределах 1.2 (2.0)–2.5. По нашим результатам, наиболее низкие значения этого соотношения наблюдаются на территории разгрузки высокотемпературных грифонов, что свидетельствует о нарушении поступления железа в растения (табл. 5).

Соотношение Fe/Zn в кормовых растениях составляет 1.7, тогда как в степной растительности Забайкалья оно значительно выше (9.5) за счет очень высокого содержания железа [25]. На аллювиальной равнине это соотношение в растениях *P. anserina* достигает 15.4, а на диапировых валах снижается в 2.2–6.0 раза.

ТАБЛИЦА 4

Коэффициенты биологического поглощения в зоне влияния Кучигерских гидротерм

Элемент	Ключевой участок			
	КУ-1	КУ-2	КУ-3	КУ-4
Макроэлементы				
Ca	4.80	4.80	3.20	3.40
Na	10.50	4.00	2.10	1.50
P	51.40	69.20	29.30	41.40
K	16.70	1.50	2.10	1.60
Mg	5.70	5.50	5.80	3.00
S	5.50	22.80	22.40	60.70
Микроэлементы				
Al	0.17	0.08	0.18	0.11
Fe	0.16	0.15	0.24	0.31
Mn	17.60	2.60	9.70	2.40
Sr	7.60	2.70	1.50	0.94
Zn	19.10	8.30	19.50	9.60
Ba	2.50	0.23	0.41	0.47
Ti	0.18	0.09	0.17	0.11
Li	22.20	3.60	14.30	5.60
Cu	3.70	3.70	5.30	7.60
Cr	0.63	0.91	1.20	0.74
Ni	1.30	1.20	3.70	1.60
V	0.05	0.12	0.22	0.19
Ce	0.16	0.15	0.26	0.19
La	0.19	0.17	0.40	0.26
Mo	2.00	8.00	2.30	3.00
W	0.17	0.93	0.87	1.00
Co	0.20	0.09	1.00	0.32
Sc	0.18	0.11	0.24	0.20
Y	0.18	0.11	0.20	0.12

ТАБЛИЦА 5

Соотношения элементов в растениях *P. anserina* в зоне влияния Кучигерских гидротерм

Соотношение элементов	КУ-1	КУ-2	КУ-3	КУ-4
Fe/Mn	0.7	4.1	1.4	6.5
Ca/Sr	34.7	81.9	63.3	116.0
Ca/Ba	319.0	437.0	186.0	183.0
Sr/Ba	9.2	5.3	2.9	1.6
K/Ba	102.0	106.0	72.6	51.6
Cu/Mo	6.6	6.2	17.1	13.1

Соотношение Ca/Sr в растениях имеет большое значение для выявления биогеохимических провинций с высоким содержанием стронция и связанных с этим эндемических заболеваний. Несмотря на то, что соединения стронция обладают слабой токсичностью, высокий уровень элемента в среде связан с риском развития ряда патологий (хондростеодистрофия (болезнь Кашина–Бека), стронциевый рахит, ломкость костей) из-за возможности замещения кальция стронцием в костях. У животных и у людей это приводит к деформации скелета и карликовому росту [26]. Исходя из критериев, установленных для растений, значения соотношения $Ca/Sr \geq 100$ указывают на удовлетворительную экологическую ситуацию, а $Ca/Sr < 10$ – на чрезвычайную экологическую ситуацию [27].

Как уже было отмечено, содержание кальция в растениях *P. anserina* в районе исследований существенно не различалось, а содержание стронция было в 2.7 раза выше на территории разгрузки высокотемпературных грифонов; кроме того, КБП стронция на этой территории возрастал в 8.4 раза. Это привело к существенным изменениям в соотношении Ca/Sr: оно снижалось со 115 (в центральной части аллювиальной равнины) до 35 (на территории разгрузки высокотемпературных грифонов). Полученные нами данные согласуются с результатами ранее проведенных исследований, на основании которых в районе Кучигерского источника выявлены геохимические провинции с аномально высокими концентрациями стронция в почвах [12].

Снижение соотношения Cu/Mo в кормовых растениях может привести к возникновению мочекаменной болезни у сельскохозяйственных животных. Высокие концентрации молибдена усиливают активность фермента ксантинооксидазы, что приводит к образованию мочевой кислоты и формированию биолитов. Также молибден, замещая медь и фосфор в соединениях, снижает активность фосфатаз и медьсодержащих

ферментов, которые нарушают белковый обмен [25]. Оптимальное соотношение этих элементов в растениях составляет 12–16 [23], в степной растительности Забайкалья оно часто значительно ниже (3.8) [25]. В районе наших исследований соотношение Cu/Mo в растениях соответствовало оптимальным значениям на аллювиальной равнине и прибрежном диапировом валу, тогда как на территории субаквальной разгрузки гидротерм оно было ниже в 2.0–2.8 раза.

Повышенное по сравнению с кларком содержание бария в почвообразующих породах, почвах и растительности Забайкалья приводит к нарушению его соотношений с другими элементами (прежде всего, с кальцием) и возникновению эндемических заболеваний животных (например, остеодистрофии) [28]. В растениях барий образует труднорастворимые фосфаты $Ba_3(PO_4)_2$, что также приводит к нарушению обмена веществ. В зоне субаквальной разгрузки гидротерм соотношение Ca/Ba было почти в два раза выше, чем на остальной территории. Повышенные концентрации солей бария оказывают негативное действие на поглощение и обмен калия [29]. Согласно нашим данным, в растениях *P. anserina* наблюдается сопряженное изменение концентрации этих элементов ($r = 0.74$, $P = 0.05$), однако соотношение K/Ba в растениях в зоне субаквальной разгрузки гидротерм было в 1.5–2.0 раза выше, чем на аллювиальной равнине и прибрежном диапировом валу. При повышенных концентрациях ионы бария занимают большее число адсорбционных мест связывания в корневой системе, в результате чего поступление некоторых элементов в надземную часть снижается [30]. Полученные нами данные свидетельствуют о возможном конкурентном взаимодействии Sr/Ba. Это соотношение увеличивается в растениях, растущих на диапировых валах, в 1.8–5.8 раза, где отмечается снижение концентрации бария как в растениях, так и в почве.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований установлено, что в зоне влияния Кучигерских гидротерм растения *P. anserina* незначительно отличаются по содержанию кальция, калия, магния, фосфора, серы и цинка. В зоне субаквальной разгрузки термальных вод эти растения накапливали больше стронция, натрия и лития (вблизи выхода высокотемпературных грифонов), а также вольфрама и молибдена (вблизи

выхода низкотемпературных грифонов). На прибрежном диапировом валу, где обнаружена чрезвычайно высокая активность восхождения газогидротермальных грязевых флюидов, концентрации алюминия, марганца, титана, хрома, никеля, кобальта, лантана, иттрия в растениях были максимальны.

В золе растений *P. anserina* на всех ключевых участках отмечается превышение кларковых значений, установленных для растений мира по следующим элементам: Ca ($K_k = 2.0-3.6$), Na ($K_k = 2.4-4.8$), Sr ($K_k = 3.5-9.5$), Ba ($K_k = 2.7-6.6$), Li ($K_k = 6.0-17.0$), W ($K_k = 25.0-47.0$), Sc ($K_k = 6.0-21.0$).

Для установленного диапазона концентраций элементов выявлены тесные корреляционные связи между содержанием в растениях и почве S, Fe, Al, Sc, Ba, Ti, Cu, La, Cr, Ce, Y ($r = 0.51-0.97$, $P = 0.05$), а также Na, Sr, Li ($r = (-0.79)-(-0.92)$, $P = 0.05$).

К энергично потребляемым растениями химическим элементам относятся P и S (КБП = 22.4–69.2); к элементам сильного накопления – Ca, Na, K, Mg, Mn, Sr, Zn, Cu, Li, Ni и Mo (КБП = 1.5–10.5). Остальные элементы (Al, Fe, Ba, Ti, Cr, V, Ce, La, W, Co, Sc, Y) относятся к элементам слабого накопления и среднего захвата (КБП = 0.1–0.9). При этом интенсивность накопления элементов растениями из почвы значительно варьировала в зависимости от условий произрастания, что может быть одной из причин нарушений соотношений Fe/Mn, Fe/Zn, Cu/Mo, Ca/Sr, Ca/Ba, K/Ba, Sr/Ba и развития эндемических заболеваний у животных и человека на этой территории.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18–04–00454 А.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Чернявский М. К., Плюснин А. М., Дорошкевич С. Г., Будаев Р. Ц. Рекреационно-бальнеологические особенности северо-восточной части Баргузинской котловины // География и природные ресурсы. 2018. № 2. С. 63–72.
- 2 Ломоносов И. С. Геохимия и формирование современных гидротерм Байкальской рифтовой зоны. Новосибирск: Наука, 1974. 168 с.
- 3 Плюснин А. М., Замана Л. В., Шварцев С. Л., Токаренко О. Г., Чернявский М. К. Гидрогеохимические особенности состава азотных терм Байкальской рифтовой зоны // Геология и геофизика. 2013. № 5. С. 647–664.
- 4 Вилор Н. В., Андрулайтис Л. Д., Зарубина О. В., Данилов Б. С. Геохимия сейсмоактивных региональных разломов (Байкальская рифтовая зона, Восточная Сибирь) // Геохимия. 2015. № 1. С. 64–82.

- 5 Плешанов А. С., Тахтеев В. В. Рефугиумы в Байкальской Сибири как резерваты уникального биоразнообразия // Развитие жизни в процессе абиотических изменений на Земле. 2008. № 1. С. 358–370.
- 6 Убугунов В. Л., Хитров Н. Б., Убугунова В. И., Жамбалова А. Д., Рупышев Ю. А., Аюшина Т. А., Парамонова А. Е., Цыремпилов Э. Г., Насатуева Ц. Н. Эндеогенный фактор и морфологическое строение почв в зоне влияния Кучигерских гидротерм (Байкальская рифтовая зона, север Баргузинской котловины) // Природа Внутренней Азии. Nature of Inner Asia. 2018. № 4(9). С. 54–72.
- 7 Лунина О. В., Гладков А. С., Неведрова Н. Н. Рифтовые впадины Прибайкалья: тектоническое строение и история развития. Новосибирск: Академ. изд-во "Гео", 2009. 316 с.
- 8 Убугунов В. Л., Убугунова В. И., Рупышев Ю. А., Хитров Н. Б. Почвенно-растительный покров болот и заболоченных понижений в зоне влияния термальных полей Баргузинского рифта // Природа Внутренней Азии. Nature of Inner Asia. 2019. № 3. С. 37–53.
- 9 Хитров Н. Б., Убугунов В. Л., Убугунова В. И., Рупышев Ю. А., Аюшина Т. А., Жамбалова А. Д., Цыремпилов Э. Г., Парамонова А. Е., Насатуева Ц. Н. Газогидротермальное турбирование почв как фактор формирования микроповышений // Почвоведение. 2020. № 2. С. 133–151.
- 10 Хитров Н. Б., Убугунов В. Л., Убугунова В. И., Рупышев Ю. А., Аюшина Т. А., Жамбалова А. Д., Цыремпилов Э. Г., Парамонова А. Е., Насатуева Ц. Н. Морфологическое строение почв в ближайшей зоне влияния Кучигерских гидротерм (Баргузинская котловина) // Почвоведение. 2019. № 12. С. 1430–1453.
- 11 Убугунов В. Л., Хитров Н. Б., Чижикина Н. П., Убугунова В. И., Варламов Е. Б., Жамбалова А. Д., Четченко Е. С. Свойства и минералогический состав темногумусовой квазиглеевой солончаковой солонцеватой криотурбированной мерзлотной почвы Баргузинской котловины (Бурятия) // Бюлл. Почв. ин-та им. В. В. Докучаева. 2018. № 92. С. 62–94.
- 12 Жамбалова А. Д. Засоленные почвы зон разломов Кучигерских гидротерм и их геохимические особенности: автореф. дис. ... канд. биол. наук. Улан-Удэ, 2018. 22 с.
- 13 Воронова О. Г. Онтогенез и экология ценопопуляций лапчатки гусиной (*Potentilla anserina* L.) на юге Западной Сибири: автореферат дис. ... канд. биол. наук. Томск, 1999. 17 с.
- 14 Пыхалова Т. Д., Аненхонов О. А., Бадмаева Н. К., Найданов Б. Б. Конспект флоры засоленных местообитаний Западного Забайкалья // Изв. Иркут. гос. ун-та. Серия: Биология, Экология. 2013. Т. 6, № 1. С. 86–101.
- 15 Теория и практика химического анализа почв / Под ред. Л. А. Воробьевой. М.: ГЕОС, 2006. 400 с.
- 16 Перельман А. И., Касимов Н. С. Геохимия ландшафта. М.: Астрель-2000, 1999. 768 с.
- 17 Зайцев Г. Н. Математика в экспериментальной ботанике. М.: Наука, 1990. 296 с.
- 18 Ткалич С. М. Некоторые общие закономерности содержания химических элементов в золе растений. Биогеохимические поиски рудных месторождений. Улан-Удэ: Изд-во СО АН СССР, 1969. 179 с.
- 19 Касимов Н. С., Власов Д. В. Кларки химических элементов как эталоны сравнения в экогеохимии // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2015. № 2. С. 7–17.
- 20 Батурина Е. Е., Рипп Г. С. Молибденовые и вольфрамовые месторождения Западного Забайкалья (основные черты металлогении и геохимии). М.: Наука, 1984. 152 с.
- 21 Гребенщикова В. И., Носков Д. А., Герасимов Н. С. Геохимия и условия формирования Ангаро-Витимского

- гранитоидного батолита, Прибайкалье // Вестн. ИрГТУ. 2009. № 3. С. 24–30.
- 22 Status and Dynamics of Forests in Germany: Results of the National Forest Monitoring / N. Wellbrock, A. Bolte (Eds). Vol. 237. Springer International Publishing, 2019. 384 p.
- 23 Kabata-Pendias A. Trace Elements in Soils and Plants. 4th ed. BocaRaton, USA: CRC Press, 2011. 505 p.
- 24 Шихова Н. С. Эколого-геохимические особенности растительности Южного Приморья и видоспецифичность арборифлоры в накоплении тяжелых металлов // Сибирский лесной журнал. 2017. № 6. С. 76–88.
- 25 Кашин В. К. Особенности накопления микроэлементов степной растительностью Западного Забайкалья // Агрохимия. 2014. № 6. С. 69–76.
- 26 Ермаков В. В., Гуляева У. А., Тютиков С. Ф., Кузьмина Т. Г., Сафонов В. А. Биогеохимия кальция и стронция в ландшафтах Восточного Забайкалья // Геохимия. 2017. № 12. С. 1115–1127.
- 27 Критерии оценки экологической обстановки территорий для выделения зон чрезвычайной экологической ситуации и зон экологического бедствия (утв. Минприроды РФ 30 ноября 1992 г.).
- 28 Кашин В. К. Барий в компонентах ландшафтов Западного Забайкалья // Почвоведение. 2015. № 10. С. 1242–1253.
- 29 Chaudry F. M., Wallace A., Mueller R. T. Barium toxicity in plants // Communications in Soil Science and Plant Analysis. 1997. No. 8. P. 795–797.
- 30 Klumpp A., Domingos M., Klumpp G. Foliar nutrient contents in tree species of the Atlantic Rain Forest as influenced by air pollution from the industrial complex of Cubatão, Se-Brazil // Water, Air and Soil Pollut. 2002. Vol. 133, No. 1-4. P. 315–333.