

А. М. АНТОНЕНКО

ЛОКАЛЬНЫЙ ПОЧВЕННО-БИОГЕОХИМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ СОСТОЯНИЯ ЛУГОВО-СТЕПНЫХ ЭКОСИСТЕМ ЮЖНОГО ПРИБАЙКАЛЯ

Получены новые данные, отражающие особенности функционирования лугово-степных экосистем южного побережья Байкала. Определены фоновые концентрации химических элементов (Ca, Ba, Sr, Mg, Cu, Ni, Co, Cr, Pb) в различных компонентах природной среды (почва, растения, микробиота). Показана целесообразность использования биогеохимических показателей при проведении мониторинга состояния природной среды.

New evidence has been obtained, which reflects the regularities of functioning of the meadow-steppe ecosystems along the southern shores of Baikal. Concentrations of chemical elements (Ca, Ba, Sr, Mg, Cu, Ni, Co, Cr, and Pb) were determined for different components of natural environment (soil, plants, and mycobiota). It is shown that biogeochemical indicators would be appropriate for use in monitoring the state of natural environment.

Исследуемая территория побережья Байкала (Слюдянка–порт Байкал) с различным проявлением остепнения тянется сплошной полосой в юго-западном направлении на 80 км вдоль береговой линии озера, местами на два-четыре километра удаляясь от него по долинам рек. По мнению одних авторов, остепненные экосистемы сохранились здесь как реликтовые со времен формирования растительности в ксеротермический период [1–3], другие же считают [4], что формирование степных и остепненных сообществ на Байкале — это отражение регионально-топологических особенностей природной среды. Активной ксерофитизации растительного покрова, кроме гидротермических факторов, способствуют длительные антропогенные (рубка, распашка, пожары, выпас скота) и зоогенные. Наиболее сильные изменения природных комплексов на этой территории произошли вследствие строительства и эксплуатации железной и автомобильной дорог.

Современные лугово-степные экосистемы прибрежной полосы Байкала как уникальные объекты, характеризующиеся неповторимым видовым разнообразием растительного мира, требуют многофункционального научного исследования. К сожалению, в проводимых работах не затрагиваются почвенно-биохимические аспекты, которые служат индикаторами при выявлении особенностей функционирования экосистем, их биогеохимической трансформации под воздействием различных антропогенных факторов. Основной прессинг на природные объекты наблюдается в прибрежной части озера, где расположены авто- и железнодорожные магистрали, а также малые города и поселки Кругобайкальской железной дороги — памятника архитектуры федерального значения.

© 2006 Антоненко А. М.

Объектами нашего исследования служили лугово-степные экосистемы, различающиеся по сложности рельефа, распределению тепла и влаги, а также по стационарной нагрузке (придорожные экосистемы, находящиеся в зоне воздействия транспорта — одного из активных источников загрязнения компонентов окружающей среды).

В статье приводятся результаты изучения геохимического фона почвенного покрова, особенностей функционирования микробиоты и биохимической активности. В высушенных образцах почв определялись рН, содержание гумуса, общего и легкогидролизуемого азота, количество микробиоты, активность окислительных ферментов. В пробах почв, растениях, микробиоте на спектрографе ДФС-8 устанавливались концентрации химических элементов.

При мониторинге лугово-степных экосистем основное внимание уделялось почве — одному из основных компонентов ландшафта, уникальной среде для растений и биоты. В ней протекают разнообразные биогеохимические и миграционные процессы, она выступает природным сорбентом различных химических веществ и показателем степени деструкции природной экосистемы.

Почвообразующие породы отрогов хр. Хамар-Дабан на южном побережье озера представлены амфиболитами, гнейсами, мраморами, с выходом которых связано развитие кальцефильной флоры, в южном и юго-западном направлениях по побережью (район ст. Култук) — гнейсами с прослоями сланцев и мраморов, к которым приурочены чарокиты. На Шарыжалгайском выступе (устья рек Шарыжалгай и Шабартуй) почвообразующие породы представлены гранулитами, наиболее окисленными гнейсами, чарокитами, мраморами. Почвы под лугово-степной растительностью на южных, обращенных к Байкалу, склонах различной крутизны отличаются облегченным гранулометрическим составом, коротким профилем, высокой порозностью и водопроницаемостью, различной зашебненностью и относятся к холодным сезонно-мерзлотным [5].

Малое количество снега (до 3–10 см), часто выдуваемого ветрами (уже в феврале, марте), приводит не только к дефициту влаги, особенно в весенний и летний периоды, но и к глубокому промерзанию и раннему оттаиванию почв [6]. Недостаток влаги в весенний период сопряжен с высокими летними температурами. Так, в лугово-степных экосистемах прибрежной полосы озера (отроги Хамар-Дабана и Олхинского плато) радиационная температура почвы (июнь, 2004–2005 гг.) изменялась от 30 до 39° с наибольшей в локальных степных участках (верхняя часть крутых склонов). Температура поверхности почвы остепненных разнотравно-сосновых лесов на склонах различной крутизны южной экспозиции несколько ниже — 25–32°. Коэффициент теплообеспеченности и увлажненности [7] колебался соответственно от 0,56–0,60 до 0,67–0,74. Последний значительно выше, чем в устье р. Бол. Голоустной и в Приольхонье.

Выявлены различия почв по увлажнению. По средним данным за 2003–2004 гг. наиболее увлажнены лесные почвы (органоминеральный горизонт) северо-западных экспозиций (35 %), слабо (5–8 %) — дерновые остепненные южных склонов. Различное увлажнение почв связано с влиянием локальных факторов — характером органогенных горизонтов и щебнистостью почв, определяющей характер дренажа [8].

Экологическая обстановка рассматриваемой территории оценивалась по содержанию в почвах, а частично в растениях и микроскопических объектах (микроскопические грибы) тяжелых (Cu, Co, Ni, Pb) и щелочноземельных (Ca, Mg, Sr, Ba) металлов. Выявлено, что с точки зрения загрязнения ими почвенной среды аэрозольным путем исследуемые объекты являются относительно чистыми (табл. 1). Некоторую тревогу может вызвать уровень содержания металлов в почвах придорожных крутосклонных лугово-степных экосистем полосы отчуждения железнодорожного и автомобильного транспорта, где содержание никеля и свинца превышает кларк для почв, а также их концентрацию в фоновых почвах. Здесь же интенсивно аккумулируются кобальт, хром и медь.

Содержание щелочноземельных элементов в придорожных экосистемах существенно отличается от кларка для почв. Следует отметить заметную обогащенность такими элементами различных экосистем в верхней части почвенного профиля. Так, концентрация кальция в них колеблется от 17 791 до 47 674 мг/кг, бария — от 577 до 1325, стронция от 308 до 476, магния от 9850 до 23 364 мг/кг.

С глубиной количество кальция и магния увеличивается соответственно в 1,2 и 1,1 раза, а бария и стронция уменьшается — в 0,9 и 0,6 раза. В фоновых лугово-степных экосистемах юго-западного побережья (Шарыжалгайский выступ) не выявлено резкого перераспределения щелочноземельных элементов по профилю почв. Их концентрация чаще всего несколько выше кларковых значений (см. табл. 1). Сходный характер аккумуляции химических элементов наблюдается в почвах мелколиственного леса (юго-западный склон на мысе Шаманском).

Установлено, что биоаккумуляция тяжелых металлов-загрязнителей в наземной биомассе растений рассматриваемых экосистем колеблется в широких пределах и зависит от места произрастания и качественного состава растений (табл. 2). Наиболее загрязненные растения встречаются вдоль придорожной полосы автомагистрали, в 0,5–3 м от нее. Как показал анализ биоаккумуляции, интенсив-

Таблица 1

Динамика химических элементов в лугово-степных экосистемах (слой почв 0–10 см), мг/кг

Местоположение	Ca	Ba	Sr	Mg	Cu	Ni	Co	Cr	Pb
<i>Придорожные экосистемы полос отчуждения автомобильного и железнодорожного транспорта</i>									
Остепненный крутой склон отрога хр. Хамар-Дабан, разр. 1	47 674	1325	476	23 364	48,5	74,8	17,0	57,0	28,0
Остепненный крутой склон отрога хр. Хамар-Дабан, мыс Шаманский, разр. 2	19 029	577	308	14 888	18,9	62,7	26,3	73,3	16,1
Остепненный склон Олхинского плоскогорья, ур. Чертова гора, разр. 3	17 791	858	363	9850	28,0	43,3	14,2	60,2	24,0
Мелколиственный с рододендроном лес, мыс Шаманский, разр. 4	14 199	479	224	11 507	12,3	52,6	9,01	109,6	14,4
<i>Фоновые лугово-степные экосистемы, Шарьжалгайский выступ</i>									
Остепненный крутой склон в долине р. Шарьжалгай, разр. 5	24 300	813	415	17 400	14,2	24,6	11,3	43,6	10,1
Верхняя часть крутого склона с пятнами остепнения, разр. 6	16 240	610	319	5300	17,2	18,4	9,4	39,6	12,2
Нижняя часть остепненного склона, разр. 7	18 325	680	306	8200	19,6	38,0	14,5	48,2	13,0
Кларк для почв, по [9]	13 700	650	300	6300	20	40	10	200	10

нее всего в биомассе растений накапливается медь. Затем в ряду биологического поглощения следует свинец, интенсивность накопления которого, охарактеризованная как коэффициент биологического поглощения (K_6), представляющий отношение количества элемента в золе биомассы растений к его содержанию в почве [10], варьирует незначительно ($K_6 = 0,52-0,71$) и превышает эти показатели в биомассе растений условно не загрязненных экосистем.

Выявлено, что содержание меди в микроскопических грибах было выше, чем в почвах, о чем свидетельствует высокий коэффициент биологического поглощения. Это позволяет отметить их значительный вклад наряду с растениями в биологический круговорот тяжелых металлов-загрязнителей и влияние на уровень содержания этих металлов в почве. Микроскопические грибы в результате разнообразных процессов (биологическое поглощение, ионный обмен комплексообразования, адсорбция и микроосаждение) способны аккумулировать существенное количество химических элементов, таких как кальций, барий, стронций, магний (см. табл. 2). Причем биосорбционной способностью обладают как живые грибы, так и органические остатки, образующиеся после их гибели [11].

Важный показатель при почвенно-биогеохимическом мониторинге экосистем — реакция почвенного раствора, влияющая не только на миграционную активность загрязнителей, но и на особенности

Таблица 2

Содержание химических элементов в золе лугово-степных растений и в микроскопических грибах (гифомицетах)

Группы растений, микроорганизмы	Cu	Ni	Co	Cr	V	Pb	Ca	Ba	Sr	Mg	Коэффициент биологического поглощения (K_6)		
	мг/кг						%				Cu	Ni	Pb
<i>Фрагмент остепненного склона (средняя часть), ур. Чертова гора, долина р. Култучной, разр. 3</i>													
Надземная биомасса (альпийская ромашка, тысячелистник, кермек, злаки)	79	12	4,6	52	61	17	4,8	0,07	0,09	2,3	2,8	0,28	0,71
Микроскопические грибы	104	11	1,9	16	8	—	7,9	0,04	0,01	0,06	3,7	0,26	—
<i>Фрагмент остепненного склона (нижняя часть), разр. 3а</i>													
Надземная биомасса (мышинный горошек, полынь, тысячелистник, злаки)	90	11	2,6	31	16	12	7,0	0,1	0,1	3,1	2,1	0,42	0,52
Микроскопические грибы	115	13	2,8	28	10	—	8,6	0,07	0,01	0,07	2,9	0,31	—
<i>Остепненный склон (нижняя часть), Шарьжалгайский выступ (долина р. Шарьжалгай), разр. 7</i>													
Надземная биомасса (полынь, тысячелистник, злаки)	64	6,3	1,3	44	14	3,0	3,9	0,05	0,06	2,1	3,2	0,17	0,23
Микроскопические грибы	72	1,8	1,2	14,2	8,2	—	3,6	0,02	0,02	0,05	3,6	0,01	—

**Результаты анализов почв в слое 0–10 см
(август, средние значения двухлетних исследований)**

Показатели	Почвенные разрезы*				
	1	2	3а	4	6
рН водный	7,6	7,5	7,1	5,6	6,9
Общий азот, %	0,45	0,57	0,29	0,45	0,18
Легкогидролизуемый азот, мг/100 г	0,39	0,46	0,18	0,72	0,12
Гумус, %	4,5	4,4	3,4	10,0**	3,2
C:N	8,7	4,2	7,5	1,4	6,4

* Почвы: 1 — дерновая остепненная, 2 — дерновая остепненная, 3а — лугово-степная, 4 — дерновая лесная, 6 — дерновая остепненная.

** Потеря при прокаливании.

функционирования биотических компонентов, таких как растения, простейшие животные и микроорганизмы. Как показали аналитические данные, в изучаемые периоды (июль–октябрь) реакция почвенного раствора в придорожных лугово-степных экосистемах была щелочной, а в естественных степных экосистемах — нейтральной в отличие от кислой и слабокислой в лесных (табл. 3).

Установлено, что своеобразие природной среды (снижение увлажненности и повышенные локальные температурные параметры, разреженность и малая продуктивность растительных сообществ) наряду с нейтрально-щелочными особенностями почвенного раствора лугово-степных экосистем сопряжено со средней обогащенностью почв гумусом и легкогидролизуемым азотом (см. табл. 3). Здесь отмечено сравнительно меньшее содержание углерода и общего азота, чем в других районах Байкала [8]. Отношение C:N в почвах, колеблющееся в пределах 4–8, свойственно мягкому гумусу, что свидетельствует о высокой их обогащенности азотом [12].

Выявлено, что независимо от гранулометрического состава и местоположения характерный признак рассматриваемых почв — фульвально-гуматный тип гумуса (Сгк:Сфк > 1), по составу близкого к почвенному антропогенного мелколистственного леса (мыс Шаманский, разр. 2) и резко отличающегося от гумуса лесных почв под темнохвойной растительностью менее фульватным характером.

Особое место в почвенном метаболизме занимает ферментативное окисление фенольных соединений, которые вместе с продуктами разрушения танинов и лигнинов образуют основную часть мертвого органического вещества на земле. Катализаторами этого процесса являются окислительные ферменты — фенолоксидазы (полифенолоксидаза и пероксидаза). Благодаря уникальным ферментативным свойствам сложные фенольные соединения переходят в низкомолекулярные и служат структурными единицами при образовании гумусовых веществ почвы [13]. Величина, выражающая отношение активности полифенолоксидазы к пероксидазе позволяет судить о преобразовании катализируемых ими процессов. Поскольку полифенолоксидаза участвует в окислении ароматических соединений и в их дальнейшей конденсации в молекуле гумусовых веществ, активность этого фермента может служить индикатором активности гумусообразования [14].

Влияние пероксидазы направлено на окисление гумусовых веществ и других фенольных соединений как единственного источника энергии и поэтому влияет на минерализацию гумуса [15]. Это позволяет использовать содержание окислительных ферментов и отношения между ними как биоиндикационные тесты при выявлении особенностей функционирования лугово-степных экосистем побережья Байкала. Выявлена ведущая роль полифенолоксидазы в метаболизме фенолсодержащего вещества. Сходные по свойствам и генезису почвы под лугово-степной растительностью отличаются близкими показателями полифенолоксидазной активности. Высокая активность полифенолоксидазы отмечена в ризосфере растений и в слое почв 0–10 см (табл. 4), обогащенном гумусом. Особенность биохимического режима минеральных горизонтов проявляется в невысокой активности окислительных ферментов.

Современные лугово-степные экосистемы побережья Байкала представляют собой природные и антропогенные экосистемы, где недостаток влаги, высокие летние температуры, промерзание почв вследствие небольшого снежного покрова, наличие различных химических элементов и высокое рН почвенной среды создают экстремальные условия для существования живых организмов. Они формируют специфические микробные сообщества, которые выступают функциональным ядром [16] лугово-степных экосистем, зависящих не только от экологических, но и от антропогенных факторов.

Одним из мощнейших экологических факторов является влага, оказывающая многостороннее воздействие на почвенную биоту и приводящая к перестройке почвенного микробиоценоза. Как установлено (см. табл. 4), в исследуемых почвах доминируют бактериальные и актиномицетные комплексы (прокариотная группа), типичные и для почв настоящих степей. Считается [17], что эволюция актиномицетов связана главным образом с их адаптацией к условиям почвенной среды (устойчивость к высушиванию, высокая инсоляция и образование спор). Кроме того, они способны проникать в глубь почвы и колонизировать новые пространства, осуществляя перенос не только питательных веществ, но и химических элементов, в том числе тяжелых металлов.

Биологические свойства почв (средние значения двухлетних исследований за август)

Фитоценоз	Слой почвы, см	Кол-во микроорганизмов (КОЕ), тыс./г почвы			Активность ферментов, мг хинона на 10 г почвы за 30 мин		
		использующих		микроскопические грибы (гифомицеты)	поли-фенол-оксидаза	пероксидаза	
		органический азот (гетеротрофные бактерии)	минеральный азот (эвтрофные) бактерии				актиномицеты
<i>Дерновая остепненная почва, разр. 1</i>							
Редкий злаково-разнотравный (в разнотравье полынь, зонтичные)	0–10	84	140	80	0,6	22	7
	10–20	20	35	10	0,01	20	4
<i>То же, разр. 2</i>							
Редкий злаково-полынный с обильной альпийской ромашкой	0–10	142	164	45	0,2	90	40
	10–20	84	84	13	0,02	39	54
<i>То же, разр. 3а</i>							
Обильный злаково-разнотравный с мышинным горошком, полынью, с редким папоротником	0–10	180	198	75	1,0	36	12
	10–20	90	92	13	0,4	18	9
<i>Дерновая остепненная почва, юго-западное побережье Байкала, разр. 6</i>							
Разреженный злаково-разнотравный с лапчаткой, полынью	0–10	52	63	38	0,4	19	2
	10–20	14	16		0,01	16	4
<i>Степная каменистая почва, разр. 7</i>							
Бедноразнотравный мелкодерновинный с пятнами редкого ковыля	0–10	62	81	62	0,5	18	1,5
	10–20	10	18	4	0,1	6	0,9

Численность актиномицетов в сообществе с микроорганизмами, ассимилирующими минеральные соединения азота, исчисляется тысячами колониеобразных единиц (КОЕ) в грамме абсолютно сухой почвы (см. табл. 4). Высокие значения рН почв способствуют развитию актиномицетов, тяготеющих к нейтральным и слабощелочным условиям природной среды, а также к почвам с повышенным содержанием органического вещества.

Повышенное количество прокариотных микроорганизмов, использующих минеральные формы азота, обнаружено в придорожных экосистемах, что свидетельствует об устойчивости данной экологотрофической группы к техногенным воздействиям. Таксономическая структура актиномицетов в различных почвенных разностях однообразна и представлена цветными и темноокрашенными штаммами.

Эукариотным мицелиальным грибам свойственна меньшая роль в трансформации органического вещества по сравнению с актиномицетами, но в отдельные периоды зафиксирована их высокая численность (до 1,4 тыс. КОЕ/г), приближающаяся к таковой в почвах мелколиственного леса. Биоразнообразие грибного компонента в почвах различается мало, в то время как соотношение между актиномицетами и грибами остается высоким и четко проявляется по глубине почвенного профиля.

Особенность функционирования лугово-степных экосистем — низкое содержание гетеротрофных бактерий (см. табл. 4), использующих богатые субстраты с органическими формами азота. Коэффициенты минерализации (КАА/РПА) в горизонтах 0–10 см (до 1,6) и 20–30 см (до 1,1) свидетельствуют о высокой минерализации азотсодержащего органического вещества и быстром усвоении мономерных соединений азота эвтрофными микроорганизмами, что обуславливает высокий уровень их накопления в почвах и определяет направленность и особенности почвообразовательного процесса в лугово-степных экосистемах.

Таким образом, установлена возможность использования биогеохимического исследования для диагностики современного состояния лугово-степных экосистем и мониторинга изменений, происходящих под воздействием как природных, так и антропогенных факторов. Важно отметить, что слабоустойчивые экосистемы, функционирование которых в течение длительного времени поддерживается этими факторами, требуют ограничения всех видов рекреационной деятельности, и лишь в отдельных случаях в них могут допускаться минимальные контролируемые нагрузки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мальшев Л. И. К познанию степной растительности побережий Северного Байкала // Ботан. журн. — 1957 — Т. 42, № 9.
2. Попов М. Г. Степная и скальная флоры западного побережья Байкала // Труды Байкальской лимнол. станции. — 1957. Т. 15.

3. **Пешкова Г. А.** Краткий анализ флоры степей Приангарья // Научные чтения памяти М. Г. Попова. — Новосибирск, 1960.
4. **Сочава В. Б., Липатова В. В.** Группировки степных растений в амурской подтайге // Бюл. МОИП. Сер. биол. — 1960. — Вып. 3.
5. **Мартынов В. П.** Почвы горного Прибайкалья. — Улан-Удэ, 1965.
6. **Гагарин П. К.** Снежный покров и лимит влаги в Тажеранских степях Приольхонья // География и природ. ресурсы. — 1992. — № 1.
7. **Беркин Н. С., Филиппова С. А., Кулакова Т. Я.** О перспективах совершенствования природопользования на побережье оз. Байкал // Природопользование в бассейне озера Байкал. — Иркутск, 1988.
8. **Кузьмин В. А., Антоненко А. М.** Почвы катен юго-западного Прибайкалья и их ферментативная активность // География и природ. ресурсы. — 1996. — № 4.
9. **Виноградов А. П.** Геохимия редких металлов и рассеянных химических элементов в почвах. — М.: Изд-во АН СССР, 1957.
10. **Польнов Б. Б.** Избранные труды. — М.: Изд-во АН СССР, 1956.
11. **Переломов Л. В., Канделер Э., Переломова М. В.** Влияние микроорганизмов на сорбцию свинца и цинка гетитом // Биосферные функции почвенного покрова. — Пушкино, 2005.
12. **Гришина Л. А., Орлов Д. С.** Система показателей гумусного состояния почв // Проблемы почвоведения. — М.: Наука, 1978.
13. **Щербакова Т. А.** Ферментативная активность и трансформация органического вещества. — Минск: Наука и техника, 1983.
14. **Кононова М. М., Александрова М. В.** Биохимия процесса образования и некоторые вопросы питания растений // Изв. АН СССР. — 1958. — № 1.
15. **Мишустин Е. Н., Никитин Д. М.** Атакуемость гуминовых кислот почвенной микрофлорой // Микробиология. — 1961. — Т. 30, № 5.
16. **Звягинцев Д. Г., Добровольская Т. Г., Бабьева М. П. и др.** Роль микроорганизмов в биогеоценотических функциях почв // Почвоведение. — 1992. — № 6.
17. **Калакутский А. В., Агре Н. С.** Развитие актиномицетов. — М.: Наука, 1977.

*Институт географии СО РАН,
Иркутск*

*Поступила в редакцию
22 марта 2006 г.*