

## Биогеохимические циклы тяжелых металлов в березняках зоны техногенного влияния Березовской ГРЭС-1 КАТЭКа

Л. С. ШУГАЛЕЙ, А. Н. ПЕТРУХИНА, О. А. ШАПЧЕНКОВА

*Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН  
660036 Красноярск, Академгородок*

*Красноярский аграрный университет  
660049 Красноярск, просп. Мира, 88*

### АННОТАЦИЯ

Рассматриваются биогеохимические циклы Ва, Мп, Сu, Ni и Zn в березняках, удаленных на различные расстояния от источника техногенных выбросов. Показано, что 10-летний период функционирования ГРЭС-1 не сказался на запасах тяжелых металлов в основных блоках лесных экосистем и связывающих их потоках. Баланс С в березняках указывает на их удовлетворительное экологическое состояние и способность выполнять биосферные и средообразующие функции.

Создание и функционирование первенца Канско-Ачинского топливно-энергетического комплекса (КАТЭК) Березовской ГРЭС-1 (БГРЭС-1) ведет к увеличению антропогенных, в частности техногенных, нагрузок на природные комплексы. Регион издавна освоен человеком, и леса выполняют здесь важнейшие почвозащитные, водоохранные и санитарно-гигиенические функции. Между тем лесистость территории КАТЭКа значительно ниже оптимальной (5–16 %), и 30 % лесов потеряли стабильность. Известно, что хроническое воздействие загрязняющих веществ в течение 10 лет и более на лесные экосистемы ведет к усыханию, изреживанию и последующему распаду древостоев [1, 2]. Важнейшей задачей изучения загрязнения природной среды является выявление ответных реакций лесных экосистем на определенный уровень техногенного воздействия.

Биогеохимический круговорот – функциональное свойство наземных экосистем, связывающее атмосферу ↔ растительность ↔ поч-

ву и позволяющее установить критические для их существования уровни загрязнения.

Цель настоящей работы – изучить биогеохимические циклы Ва, Мп, Сu, Ni и Zn в березняках, удаленных от источника загрязнения на различные расстояния, и выявить влияние техногенных выбросов на их экологическое состояние.

### ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ

Исследования проводились в устойчивых вторичных березняках разнотравной группы типов леса южной тайги низкогогорья Кузнецкого Алатау. По климатическому районированию территория южной тайги относится к умеренно прохладному району, подрайону достаточного увлажнения (ГТК 1.2–1.6). Пробные площади (п.п.) заложены Г. П. Кузьминой и В. Д. Стакановым в период проведения на территории региона комплексных исследований Институтом леса им. В. Н. Сукачева СО РАН [1]. В данной работе рассматриваются условно

ненарушенные березняки, расположенные в 5 км (Дубинино I), 10 (Дубинино III), 25 (Большое Озеро) и 80 км (Ново-Николаевка) от источника загрязнения. Почвенный покров представлен серыми почвами, сформировавшимися преимущественно на красноцветных карбонатных суглинках девона, плакоров и покатых склонов Кузнецкого Алатау. Николаевский березняк, удаленный от БГРЭС на 80 км, расположен в центре Назаровской котловины. Почвенный покров представлен серыми почвами на желто-бурых суглинках. Морфологический облик и актуальные свойства серых почв на различных почвообразующих породах близки [3]. Содержание гумуса в гумусово-аккумулятивном горизонте серых почв под березняками составляет 6–9 %, емкость поглощения 20–25 мг · экв/100 г почвы, почвенно-поглощающий комплекс насыщен Са, Mg (92–95 %),  $pH_{\text{водн}}$  6,8–7,0.

Березняки зоны техногенного влияния БГРЭС-1 имеют I–II класс бонитета, относятся к спелым и перестойным, к средне- и высокополнотным, характеризуются высокими запасами фитомассы (табл. 1).

Первый тур обследования березняков для установления фоновых характеристик содержания тяжелых металлов в растительности и почве проведен в 1991 г., второй – в 2001 г. Образцы древесной растительности отбира-

ли на модельных деревьях в 10-кратной повторности по общепринятым методикам. Запасы подстилок, травяного покрова и корней определяли в 10-кратной повторности шаблоном (0,03 м<sup>2</sup>). Запасы корней учитывали до глубины 20 см. Почвенные образцы отбирали в тех же точках по глубинам 0–5, 5–10, 10–20 см [4]. Химические свойства подстилок и почв, содержание углерода в различных фракциях растительных образцов определяли известными химическими методами [5], тяжелые металлы – спектроскопическим методом [6]. Для расчетов интенсивности освобождения химических элементов органического вещества мортмассы использовали константы (K) разложения, полученные экспериментальным путем: листья березы – 0,36, ветви – 0,18, кора – 0,08, корни – 0,13. Подстилка: подгор. 01 – 0,23, 02 – 0,16, 03 – 0,16 [7]. Аналитический материал статистически обработан [8].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Березовская ГРЭС-1 является мощным загрязнителем природной среды региона. В золашлаковых отходах постоянно присутствует 20–25 макро- и микроэлементов. Концентрация химических элементов составляет, мг/кг выбросов: Ва – 6070, Mn – 4490, Cu – 102,

Т а б л и ц а 1

Таксационно-морфологическая характеристика березняков зоны техногенного влияния БГРЭС-1

Показатель	Пробные площади			
	Дубинино I	Дубинино III	Большое Озеро	Н.-Николаевка
Состав древостоя	10Б	10Б	10Б	10Б
Полнота	0,8	0,7	0,7	0,8
Возраст, лет	68	85	50	53
Высота, м	25,6	25,4	25,6	25,3
Диаметр, см	22,0	23,0	22,1	20,3
Класс бонитета	(I)II	II	II	I
Фитомасса, т/га:	198,9	173,0	145,5	159,7
древостоя, в т.ч.:				
надземная	169,2	145,3	123,7	135,2
корни	29,7	27,7	21,8	24,5
напочвенного покрова, в т.ч.:	5,2	4,4	3,9	3,2
надземная часть	3,1	2,1	1,5	1,0
корни	2,1	2,3	2,4	2,5
Итого	204,1	177,4	149,4	163,2
Мортмасса, т/га, в т.ч.:	16,1	14,7	19,6	16,2
надземная часть (подстилка)	15,3	13,8	19,0	15,0
подземная	0,8	0,9	0,6	1,3

Ni – 123, Zn – 111. За 10-летний период функционирования БГРЭС отмечено статистически (>20 %) достоверное техногенное накопление тяжелых металлов в слое почвы 0–5 см, г/т:

Удаленность от источника загрязнения, км	Va	Mn	Cu	Ni	Zn
5	98	0	2	3	7
10	8	18	6	3	0
25	60	40	1	0	0

Такое распределение техногенных элементов является следствием неоднородного состава сжигаемого бурого угля, следовательно, и техногенных выбросов в атмосферу, ветрового и температурного режимов, влажности атмосферы и почв в момент выбросов и т. д.

В распределении техногенных элементов в ландшафте и формировании зон загрязнения важную роль играет высота труб источника выбросов в атмосферу. Основная концентрация выбросов в приземном слое атмосферы находится в пределах 10–14 Н (высот) труб [9]. Согласно расчетам, при высоте труб БГРЭС-1 370 м эпицентром техногенного накопления элементов должна являться п.п. Дубинино I, находящаяся в 5 км от источника загрязнения.

Накопленные в серых почвах березняков техногенные элементы относятся к различным для биоты классам опасности: Zn – к I классу, Cu и Ni – ко II классу, Mn и Va – к III классу [10]. Поступившие с техногенными выбросами в лесные экосистемы тяжелые металлы оказываются в биохимически активной среде, где идут интенсивные процессы деструкции растительных остатков, аккумуляции, миграции органических и минеральных веществ. Химические элементы техногенного происхождения могут включаться в биогеохимические циклы или только накапливаться на поверхности почвы, не вступая ни в какие химические реакции с органическим и минеральным веществом почвы.

Концентрации тяжелых металлов в различных компонентах лесных экосистем, удаленных на 5, 10, 25 и 80 км от источника загрязнения, указывают на практически одинаковый биогенный вынос Va, Mn, Cu, Ni и Zn на всех п.п. (табл. 2).

Т а б л и ц а 2

Концентрация тяжелых металлов и углерода в различных компонентах березняков, г/т (n = 40)

Компонент	Элемент											
	Va		Mn		Cu		Ni		Zn		C*	
	М	V, %	М	V, %	М	V, %	М	V, %	М	V, %	М	V, %
Листья березы	4,6	5	973	6	3,0	5	0,6	3	34,0	5	486	
Ветви	5,4	5	889	5	8,6	4	1,1	3	28,0	3	491	
Древесина ствола	5,0	3	606	7	14,0	3	1,4	1	22,0	1	495	
Кора	5,2	3	770	8	11,4	3	1,3	1	25,0	1	495	
Корни древесины	5,1	3	710	6	10,3	4	1,2	1	26,2	2	488	
Напочвенный покров	4,5	7	756	8	6,5	5	0,8	2	29,7	6	455	
Корни травянистые	4,5	6	589	8	8,9	7	1,2	2	26,0	6	488	
Подстилка	65,0	12	270	15	5,3	8	5,9	8	84,3	8	455	
Корни мертвые	4,3	5	475	5	11,1	7	1,1	2	24,5	6	488	
Почва (0–20 см)	751	10	487	12	19,1	10	24,3	12	40,1	10	–	

\*Кг/т.

Коэффициенты пространственной изменчивости исследованных химических элементов в большинстве случаев не превышают 5 %. Несколько выше они в напочвенном покрове, что обусловлено наличием трав с повышенным биологическим накоплением того или иного элемента. Так, например, повышенным относительно других трав биологическим выносом Ва характеризуются зопник клубненосный (*Phlomis tuberosa* L.) – 4,9 мг/кг, осока большехвостая (*Garex macrousa* Meinh.) – 5,6 мг/кг, горошек однопарный (*Vicia unijuga* A.Br.) – 5–6 мг/кг. Повышенное содержание Mn отмечено в зопнике клубненосном – 833 мг/кг и вейнике тупоколосковом (*Calamagrostis obtusata* Trin.) – 831 мг/кг. Cu накапливают чина луговая (*Lathyrus pratensis* L.) – 9,1 мг/кг, скерда сибирская (*Crepis sibirica* L.) – 8,4 мг/кг, подмаренник северный (*Galium boreale* L. subsp. *septentrionale* (Roem et Schult) Hara) – 88 мг/кг. Повышенной аккумуляцией Ni характеризуются чина луговая – 0,6–1,0 мг/кг, зопник клубничный – 1,0 мг/кг, василистник малый (*Thalictrum minus* L.) – 0,9, горошек многостебельный (*Vicia multicaulis* Ledeb.) – 0,5–0,6 мг/кг, Zn – горошек однопарный и горошек многостебельный – 32–34 мг/кг, овсяница сибирская (*Festuca sibirica* Hack ex Boiss (*Leucopoa albida* (Turcz.) V. Kresz et Bobr)) – 32 мг/кг.

Наряду с другими травянистыми видами выделенные растения присутствуют на каждой п.п., но представленность их в напочвенном покрове различная, что и нашло отражение в среднем содержании того или иного элемента и обусловило повышенную вариабельность в сравнении с фракциями древостоя. Наиболее высокая концентрация Ва наблюдается в ветвях и коре березы (*Betula pendula* L.), Mn аккумулируется в большей мере в листьях и ветвях, Cu – в древесине ствола, коре, корнях древесных и травянистых растений, Ni – в древесине ствола, коре и древесных корнях, Zn – в листьях, ветвях березы и травянистом покрове. Такое распределение химических элементов в растениях обусловлено как свойствами элементов, так и биологическими и физиологическими особенностями растений. Элементный химический состав растений сложился в раннюю стадию формирования жизни и сохранился до сих пор. Возникнув из косной субстанции,

живые организмы тесно связаны с окружающей средой реакциями обмена веществом и энергией, характеризуются широким диапазоном аккумуляции отдельных элементов, не отражающемся на их экологическом состоянии [11, 12]. Эти вопросы пока что понастоящему не изучены и требуют специальных исследований [11]. Накопление тяжелых металлов в подстилках обусловлено не только биологическим круговоротом, но и различной интенсивностью деструкции фракций опада почвенными беспозвоночными и микроорганизмами, педотурбацией подстилки и верхней части минерального профиля. Так, если листья березы и травянистый опад при константе (K) разложения 0,23–0,36 трансформируется за 2,5–3 года, то ветви и кора (K = 0,08), в различной степени затронутые разложением, сохраняются в подстилке в течение десятилетий, подвергаются не однократной педотурбации, и именно эти фракции древостоя характеризуются повышенным содержанием большинства микроэлементов.

Рассмотрим запасы Ва, Mn, Cu, Ni и Zn в основных блоках исследуемых экосистем и их биогеохимические потоки (табл. 3).

*Барий* накапливается в растениях, но не является жизненно необходимым элементом [13]. Запасы Ва в лесных экосистемах составляют 1485–871 кг/га. Основная его доля (99 %) в березняках приходится на почву, на растительное вещество – всего 0,43–0,27 %, в мортмассе сосредоточено 47–65 % этого количества, оставшаяся часть приходится на живую биомассу.

Чистая первичная продукция (NPP) накапливает в абс. сухом веществе 32–40 г/га Ва в год. С ежегодным опадом возвращается на почву и в почву 25–32 г/га, или 75–79 % Ва, аккумулированного в NPP. Основной (45–64 %) возврат приходится на надземный опад древостоя и напочвенного покрова. Из органического вещества опада-подстилки высвобождается и возвращается в почву ежегодно 150–224 г/га, или 21 % Ва, заключенного в органическом веществе, участвующем в разложении (см. табл. 3). Количество Ва, законсервированного в подстилке, в 3–4 раза превышает ежегодный возврат элемента в почву.

*Марганец* биологически интенсивно накапливается растениями, активно участвует в

## Циклы тяжелых металлов в березняках, г/га в год

Основные потоки	Удаленность от источника загрязнения, км			
	5	10	25	>80
1	2	3	4	5
Ba				
Продукция:				
надземная	28	24	20	19
подземная	12	12	12	14
всего	40	36	32	33
Опад:				
надземный	20	17	13	11
подземный	12	11	12	14
всего	32	28	25	25
Аккумулировано в фитомассе	8	8	8	8
Возвращено в почву при разложении мортмассы	185	150	224	163
Законсервировано в мортмассе	761	633	968	694
Вход-выход	+177	+142	+216	+155
Mn*				
Продукция:				
надземная	5	4	3	3
подземная	1	2	2	2
всего	6	6	5	5
Опад:				
надземный	3	3	3	2
подземный	2	2	2	2
всего	5	5	5	4
Аккумулировано в фитомассе	1	1	1	1
Возвращено в почву при разложении мортмассы	2	2	2	2
Законсервировано в мортмассе	6	6	6	5
Вход-выход	+1	+1	+1	+1
Cu				
Продукция:				
надземная	49	30	30	28
подземная	28	26	33	30
всего	77	56	63	58
Опад:				
надземный	30	14	11	8
подземный	27	25	32	29
всего	57	39	43	37
Аккумулировано в фитомассе	19	17	20	21
Возвращено в почву при разложении мортмассы	27	14	25	19
Законсервировано в мортмассе	136	87	138	109
Вход-выход	+8	-3	+5	-2
Ni				
Продукция:				
надземная	6	7	4	4
подземная	3	3	3	4
всего	9	10	7	8
Опад:				
надземный	4	5	2	2
подземный	3	3	3	4
всего	7	8	5	6

1	2	3	4	5
Аккумуляровано в фитомассе	2	2	2	2
Возвращено в почву при разложении мортмассы	18	15	23	13
Законсервировано в мортмассе	89	72	111	65
Вход-выход	+16	+13	+21	+11
Zn				
Продукция:				
надземная	177	159	124	117
подземная	61	72	71	78
всего	238	231	195	195
Опад:				
надземный	141	124	89	80
подземный	59	70	69	77
всего	200	194	158	157
Аккумуляровано в фитомассе	38	37	37	39
Возвращено в почву при разложении мортмассы	254	207	353	254
Законсервировано в мортмассе	1071	909	1500	1177
Вход-выход	+216	+170	+316	+215

\*Mn – кг/га в год.

ферментативных процессах растительной клетки [10, 11, 13]. Запасы его в березняках составляют 520–688 кг/га. В почвах сосредоточено 93–96 % запаса элемента экосистемы, соответственно всего 4–7 % приходится на растительное вещество, а основная (90–94 %) доля этого количества – на живую биомассу.

В чистой первичной продукции березняков накапливается 4,8–6,1 кг Mn/га в год. С наземным и подземным опадом древостоя и напочвенного покрова в почву и на почву с легкоминерализуемым органическим веществом (ЛГОВ) опада поступает 80–83 % Mn, аккумулярованного в NPP. В первичной экосистемной продукции (NEP) удерживается соответственно 17–20 % Mn.

В процессе минерализации органического вещества мортмассы в почву возвращается 20–40 % биологического захвата Mn, аккумулярованного в NPP. В мортмассе экосистемы консервируется 6–7 кг/га Mn, что равно или близко количеству элемента, необходимого для создания NPP.

Медь – элемент полубиофил и, несмотря на общую толерантность к нему растений, чрезвычайно токсичен. Ингибирующее действие на поглощение и содержание Cu в растениях оказывают присутствующие Fe и Mn, а также благоприятный режим азотного и фосфорного питания растений, харак-

терный для серых почв лесных экосистем региона [11].

Запасы меди в березняках составляют 21–26 кг/га. Основная доля (98–99 %) Cu экосистемы приходится на почву. В биомассе Cu аккумуляруется в 13–18 раз больше, чем консервируется в мортмассе.

В NPP накапливается 56–77 г Cu/га в год. Основное (48–64 %) количество сосредотачивается в надземной продукции, с опадом на почву и в почву возвращается 64–74 % Cu, используемой при создании NPP. В NEP закрепляется соответственно 26–36 % захвата NPP. При деструкции ЛГОВ в почву возвращается 25–36 % Cu, аккумулярованной в NPP. В мортмассе на 2–3 года консервируются запасы Cu, в 1,5–2 раза превышающие ежегодную аккумуляцию ее в NPP.

Никель относится к элементам полубиофилам и является незаменимым компонентом ферментов растительной клетки. Он быстро и легко извлекается растениями из почв. По данным некоторых исследователей, поглощение его растениями до определенных концентраций коррелирует с содержанием в почве [13]. Запасы Ni в лесных экосистемах составляют 12–66 кг/га. На почвенные запасы приходится около 99 % Ni экосистемы, на растительное вещество – всего 0,1–0,2 кг/га, 25–50 % этого количества приходится на биомассу.

В NPP биологическое накопление Ni составляет 7–10 г/га в год, в надземном ярусе древостоя и напочвенного покрова аккумулируется 57–72 %, в подземном – соответственно 28–43 % этого количества. С опадом на почву и в почву возвращается 62–80 % Ni, закрепленного в NPP. Удерживается в NEP соответственно 20–38 % Ni NPP. В почву при разложении мортмассы возвращается 13–23 г Ni/га в год, что в 1,6–3 раза превышает количество Ni, выносимого древостоем и напочвенным покровом при создании NPP. Количество Ni, консервируемое в мортмассе, в 8–16 раз превышает его вынос чистой первичной продукцией.

Цинк является элементом биофилом, активно накапливается в растениях, входит в состав клеточных энзимов. Запасы Zn в березняках составляют 56–91 кг/га. Содержание Zn в почве обычно отражается на накоплении его в растениях. В почвах содержится 97–98 %, в растительном веществе – соответственно 2–3 % запасов Zn в экосистеме. Основная доля Zn растительного вещества (79–80 %) приходится на биомассу.

В NPP биологическое накопление Zn составляет 195–238 г/га в год. Основная масса (63–74 %) приходится на надземную продукцию древостоя и напочвенного покрова. Возвращается с опадом на почву и в почву 80–84 % захвата Zn при создании NPP. Основная доля (84–88 %) возврата приходится на надземный опад. В NEP удерживается 16–20 % Zn, аккумулированного в NPP.

При деструкции мортмассы в почву возвращается 207–353 г/га в год, или 88–179 % Zn годовой чистой продукции березняков. В мортмассе консервируется Zn 900–1500 г/га в год, что в 4–6 раз превышает ежегодное закрепление его в NPP. В фитомассе (NEP) удерживается Zn в 6–10 раз меньше, чем возвращается в почву при деструкции мортмассы.

Таким образом, ежегодное нарастание фитомассы сопровождается и накоплением химических элементов. Их аккумуляция в NPP более чем на порядок ниже общих запасов в фитомассе. Коэффициенты аккумуляции (Ka) – отношение аккумуляции в NPP к ежегодному возврату в почву при разложении мортмассы – указывают на наиболее высокую биогенную аккумуляцию в растительном ве-

ществе Mn (Ka = 3,4) и Cu (Ka = 3,1). В меньшей степени в растительном покрове аккумулируются Zn (Ka = 0,8), Ni (Ka = 0,5) и Ba (Ka = 0,2). Общим для всех элементов является биогенное накопление их в аккумулятивной части почвенного профиля. Ежегодный возврат с опадом на поверхность почвы и в почву Ba составляет 75–79 %, Mn – 80–83, Cu – 64–74, Ni – 62–80, Zn – 80–84 % от аккумулированного в чистой первичной продукции.

В многолетних частях древостоя Ba удерживается 8 г/т, или 20 %, Mn – 1000, или 17, Cu – 17–21, или 30–36, Ni – 2, или 20–28, Zn – 37–39 г/т, или 17–20 % биологического захвата элементов при формировании ежегодного прироста. Консервация химических элементов в мортмассе превышает ежегодную аккумуляцию в первичной продукции: Ba – в 4–7 раз, Cu – в 1,6–2, Ni – в 7–15, Zn – в 4–8 раз. Исключением является Mn: поскольку это биологический элемент быстрого захвата и интенсивного круговорота, его консервация в мортмассе равна годичной аккумуляции в NPP.

Известно, что биосферные и средообразующие функции лесных экосистем определяются количественным и качественным составом органического вещества (углерода) в лесных экосистемах в целом и отдельных блоках в частности. Биологическая продуктивность и качество создаваемой продукции являются мерой экологического состояния лесных экосистем [1, 11, 15].

В березняках зоны техногенного влияния БГРЭС-1 основные запасы углерода сосредоточены в живой фитомассе (30–51 %) и почве (44–58 %). В мертвом органическом веществе законсервировано 4–5 % общих запасов углерода в экосистеме (табл. 4). В составе легкоминерализуемого органического вещества березняков преобладает подстилка. Запасы подстилки определяются количественным и качественным составом опада, интенсивностью процессов деструкции и на всех п.п. в 3–6 раз превосходят количество годового опада.

Количество углерода атмосферы, аккумулируемого ежегодно в NPP, составляет 3,3–4,2 т/га. Общий минерализационный поток в атмосферу – 2,0–2,2 т/га в год, или 52–64 % С атмосферы, потраченного на создание чи-

Т а б л и ц а 4

## Структура запасов углерода в березняках, т/га

Компоненты экосистемы	Удаленность от источника загрязнения, км			
	5	10	25	80
Фитомасса древостоев напочвенного покрова	78,4	67,3	56,6	62,1
	2,4	2,1	1,9	1,7
Всего	80,8	69,4	58,5	63,8
ЛГОВ всего	9,0	8,1	9,7	8,3
В том числе:				
опад	2,2	1,8	1,3	1,2
подстилка	6,4	5,9	8,2	6,5
корневой материал	0,4	0,4	0,3	0,6
Гумус почвы (0–20 см)	50,9	33,1	81,2	71,7
Всего	140,7	110,6	149,4	143,8

Т а б л и ц а 5

## Баланс углерода в березняках, т/га в год

Основные потоки	Удаленность от источника загрязнения, км			
	5	10	25	<80
NPP	4,2	3,8	3,4	3,3
ΣС–СО <sub>2</sub>	2,2	2,0	2,2	2,1
Баланс	+2,0	+1,8	+1,2	+1,2

стой первичной продукции (табл. 5). В фитомассе березняков региона закрепляется 1,2–2,0 т/га, или 36–48 % годового атмосферного стока углерода. Таким образом, распределение углерода по блокам и его основные потоки в березняках зоны техногенного влияния БГРЭС-1 являются характерными для лесных экосистем южной тайги Средней Сибири [7].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Биогеохимические циклы Ва, Мп, Сп, Ni и Zn в условно ненарушенных березняках, удаленных от источника загрязнения на 5, 10, 25 и 80 км, однотипны.

Техногенное вещество, поступившее в лесные экосистемы за 10-летний период функционирования БГРЭС-1, в настоящий период не включено в биогеохимический круговорот, на что указывает близкая концентрация элементов в различных фракциях древесной и напочвенной массы. Качественные различия в ежегодной аккумуляции в NPP и возврате, трансформации и консерва-

ции химических элементов в мортмассе между березняками, удаленными от источника загрязнения на различные расстояния, определяются возрастом и полнотой древостоев, различным составом напочвенного покрова.

Все березняки региона являются стоком углерода атмосферы, что свидетельствует об их удовлетворительном экологическом состоянии и способности выполнять биосферные и средообразующие функции.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 02-04-49459).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Леса КАТЭКа как фактор стабилизации окружающей среды, Красноярск, ИЛиД, 1983.
2. Человек и окружающая среда на этапе очередного развития КАТЭКа, Новосибирск, Наука, Сиб. отд-ние, 1976.
3. Классификация почв России, М., Почв. ин-т им. В. Н. Докучаева, 2000.
4. Л. О. Карпачевский, А. Д. Воронин, Е. А. Дмитриев и др., Почвенно-биогеоценологические исследования в лесных биогеоценозах, М., МГУ, 1980.
5. Е. В. Аринушкина, Руководство по химическому анализу почв, М., МГУ, 1970.



6. В. С. Борцов, Использование автоматизированной аналитической системы на основе отражательной спектроскопии в исследовании агроценозов: Автореф. канд. дис., Красноярск, 2002.
7. Э. Ф. Ведрова, В. Д. Стаканов, В. В. Чупрова, Л. С. Шугалей, Лесные экосистемы Енисейского меридиана, Новосибирск, Изд-во СО РАН, 2002, 274–287.
8. Е. А. Дмитриев, Математическая статистика в почвоведении, М., МГУ, 1991.
9. М. Е. Берлянд, Метеорологические аспекты промышленного загрязнения атмосферы, М., Недра, 1976.
10. Экология и охрана природы, Словарь-справочник, М., Academia, 2000.
11. В. Б. Ильин, Элементный химический состав растений, Новосибирск, Наука, Сиб. отд-ние, 1985.
12. В. В. Добровольский, География микроэлементов. Глобальное рассеяние, М., Мысль, 1983.
13. А. И. Пелерман, Геохимия ландшафта, М., Высш. шк., 1975.
14. В. Б. Ильин, *Почвоведение*, 1986, 9, 90–98.
15. М. А. Глазовская, Геохимия природных и техногенных ландшафтов СССР, М., Высш. шк., 1988.

## **Biogeochemical Cycles of Heavy Metals in Birch Stands of the Zone of Technogenous Influence of the Berezovo Hydroelectric Power Station-1 KATEK**

L.S. SHUGALEI, A.N. PETRUKHINA, O.A. SHAPCHENKOVA

Biogeochemical cycles of Ba, Mn, Cu, Ni and Zn are studied in birch stands situated at various distances from the source of technogenous discharges. It is demonstrated that a 10-year long period of functioning of the hydroelectric power station-1 has not told on the reserves of heavy metals in basic blocks of forest ecosystems and on the flows connecting them. The C balance in birch stands points to their satisfactory ecological condition and capacity of performing their biospheric and environment-forming functions.