УДК 911.2.:550.4

И.А. Авессаломова[1]

БИОГЕОХИМИЧЕСКАЯ НЕОДНОРОДНОСТЬ АГРОЛАНДШАФТОВ (НА ПРИМЕРЕ СРЕДНЕТАЕЖНОЙ ПОДЗОНЫ ЮГА АРХАНГЕЛЬСКОЙ ОБЛАСТИ)

Биогеохимическая неоднородность рассматривается как отражение внутреннего разнообразия агроландшафтов. Для агроценозов и растительных сообществ экологического каркаса приведены данные о фитомассе, запасе минеральных веществ и интенсивности поглощения микроэлементов. Выявлены разнонаправленные изменения фитоценозов после прекращения сельскохозяйственного использования, а также увеличение биогеохимической контрастности постагрогенных катен.

Ключевые слова: катена, агроценоз, травянистая фитомасса, биогеохимическая активность видов, залежи, средняя тайга.

Введение. Среди методологических проблем, разрабатываемых в геохимии ландшафта, А.И. Перельман неоднократно обращался к теоретическим вопросам, связанным с преобразованием природных геосистем при техногенезе. В его концепции культурного ландшафта главный упор был сделан на разнонаправленность процессов, связанных с потерей природной информации или возможностью увеличения разнообразия, а также на преобладании положительных обратных связей над отрицательными, что снижает устойчивость и способность ландшафтов к саморегуляции [Перельман, 1987]. По отношению к агроландшафтам как управляемым геосистемам разнонаправленность процессов необходимо учитывать при выборе решений для преодоления противоречий, возникающих при их функционировании. Принимая во внимание фундаментальную роль биогенеза, можно предусмотреть увеличение продуктивности агроценозов и снижение потерь биогенных элементов в геохимических сопряжениях. В процессе агротехногенеза выявляются специфика прямого геохимического воздействия и косвенные последствия, способствующие площадному и линейному распространению миграционных потоков в агроландшафтах [Перельман, Касимов, 1999; Касимов, 2013].

Активное поглощение биогенных элементов в агроценозах, их отчуждение с урожаем и вынос со стоком провоцируют отрицательный баланс биогенов, не компенсируемый внесением удобрений. Но есть данные, согласно которым поступление микроэлементов с удобрениями больше, чем использование растениями. Это создает предпосылки для загрязнения пахотных почв, вовлечения элементов в латеральную миграцию, формирования потоков рассеяния и приобретает особое значение, так как в составе удобрений содержатся элементы (As, Cd) с высокой деструкционной активностью [Баргальи, 2005]. Установлена способность элементов ингибировать или стимулировать поглощение растениями других элементов, причем главными антагонистами в отношении микроэлементов выступают Ca и P, характерные для агроземов. Эффекты взаимовлияния элементов зависят от вида агрокультур и миграционных условий [Kabata-Pendias, Pendias, 1999; Геохимия…, 1990; Глазовская, 2007]. В настоящее время сформулированы принципы классификации агроландшафтов, учитывающие зональную приуроченность, характер севооборотов, их биогеохимическую структуру и миграционные процессы в катенах [Перельман, Касимов, 1999; Касимов, 2013]. Упрощение биогеохимической структуры агроландшафтов по сравнению с естественными определяет их меньшую устойчивость, а ее поддержание требует обеспечения необходимого разнообразия и сохранения экологического каркаса [Глазовская, 1992; Николаев, Копыл, 2004]. Этим определяется актуальность биогеохимического подхода, раскрывающего роль биогенеза в организации агроландшафтов. Один из критериев внутреннего разнообразия агроландшафтов – степень их биогеохимической неоднородности, которая зависит от соседства полей с элементами экологического каркаса, и проявляется в пространственной вариабельности параметров автотрофного биогенеза (фитомассе, филогенетической специализации растений и др.).

Цель исследований состояла в установлении факторов, вызывающих биогеохимическую неоднородность агроландшафтов. При этом ставилась задача определения продуктивности агроценозов и ее изменений в зависимости от положения в катенах, выявления тенденций при трансформации биогеохимической структуры постагрогенных ландшафтов, выведенных из сельскохозяйственного использования, а также сравнения биопродукционного процесса в естественных комплексах нижних звеньев катен и их концентрационных функций как фитобарьеров на пути латеральных потоков.

Материалы и методы исследований. Объект исследований – агроландшафты, возникшие на ме-

[1] Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра физической географии и ландшафтоведения, доцент, канд. геогр. н.; *e-mail*: aiageo@yandex.ru

сте среднетаежных лесов в бассейне р. Заячья (междуречье Кокшеньги и Устьи, юг Архангельской области). Они приурочены к моренно-эрозионным и озерно-ледниковым равнинам в пределах структурного плато, сложенного пермскими мергелями, и относятся к отделу пашенных полевых агроландшафтов с севооборотом кормовых культур. Ярусность структурно-генетического каркаса, литогеохимическая неоднородность субстрата, активизация механической миграции определяют внутреннюю контрастность сопряженных элементарных агроландшафтов разного рода и класса (Н, Н-Са, Са) в гетеролитных катенах [Авессаломова, 2014]. Соседство полей, залежей, сохранившихся луговых и лесных комплексов увеличивает разнообразие элементарных ландшафтов с разными типами биологического круговорота (БИКа) (рис. 1).

того, определена фракционная структура травянистой фитомассы естественных пойменных лугов, а также лесов, входящих в экологический каркас (81 проба). Параллельно с отбором укосов взяты образцы отдельных видов растений (47 проб). Запас минеральных веществ в фитомассе рассчитан с учетом зольности их морфологических органов. Эти данные использованы при характеристике потока вещества, отчуждаемого с урожаем, и для сравнения емкости фитобарьеров в нижних звеньях катен.

В число интенсивных параметров включены значения коэффициента биологического поглощения и биогеохимическая активность растений по отношению к накоплению микроэлементов (БХА), определенные по данным приближенного количественного спектрального анализа (ПКСА) золы растений (425 проб), выполненного в Бронницкой геолого-гео-

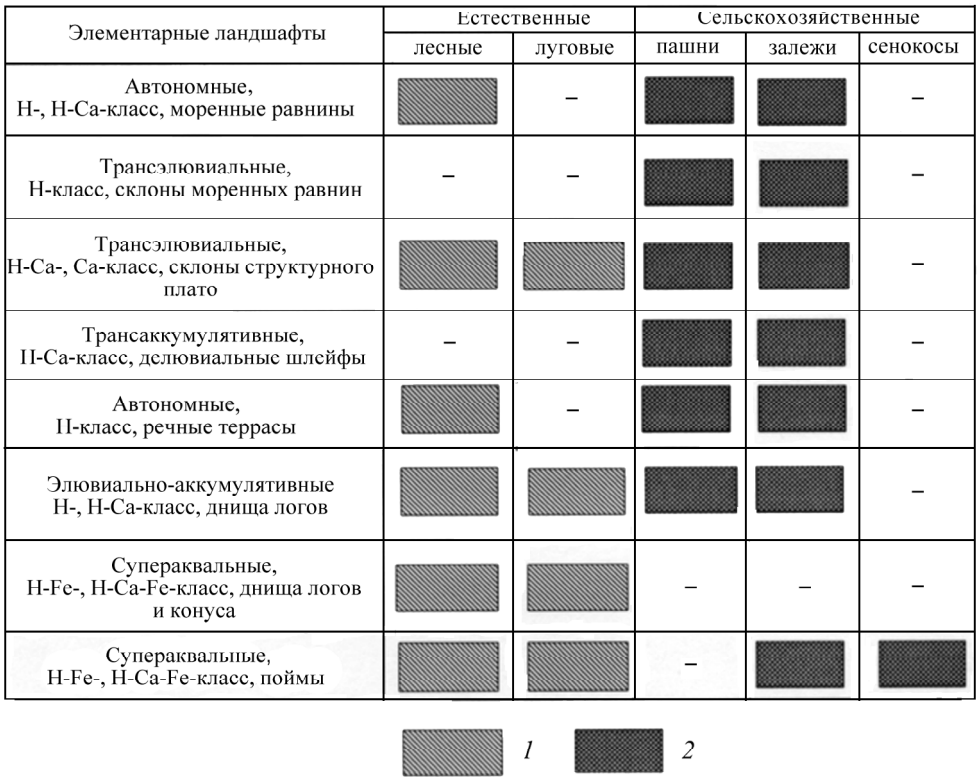

Рис. 1. Элементарные ландшафты гетеролитных катен в среднем и нижнем течении р. Заячья. Элементарные ландшафты: *1* – естественные, *2* – с агроценозами, залежами и сенокосными лугами

Fig. 1. Elementary landscapes of heterolithic catenae in the lower and middle course of the Zayach'ya River. Elementary landscapes: *1* – natural, *2* – with agrocoenoses, fallows and hay meadows

При изучении биогеохимической структуры агроландшафтов использован комплекс экстенсивных и интенсивных параметров биогенной миграции, расчет которых основан на результатах опробования растений и почв. К числу экстенсивных параметров относятся фитомасса агроценозов и ее фракционная структура, определенные по данным укосов с площадок размером 50х50 см (131 проба). В соответствии с севооборотом выбраны фуражные зерновые культуры, однолетние травосмеси и многолетние посевы клевера. Для постагрогенных ландшафтов получены данные о изменении продукции залежных лугов (98 проб) при сукцессионных сменах. Кроме

химической экспедиции ФГУП «ИМГРЭ». Показатели интенсивности биологического поглощения – кларки концентрации (КК), рассчитанные относительно литосферы, отражают общую биогенность элемента и филогенетическую специализацию растений; по сумме КК всех микроэлементов определена БХА. Эти параметры учтены при анализе факторов, определяющих биогеохимическую неоднородность катен.

Результаты исследований и их обсуждение. ***Биогеохимические параметры агрогенных катен.*** Вариабельность биогеохимических параметров в агроландшафтах связана с различиями фитомассы агроценозов, которая в период сенокошения

варьирует от 4,4 до 61,5 ц/га (C_v = 0,50%). Несмотря на различия видового состава агроценозов прослеживаются сходные тенденции разнонаправленных изменений фитомассы в зависимости от катенарной приуроченности и литогенного субстрата. Это проявляется в увеличении фитомассы на делювиальных шлейфах, куда при плоскостном смыве поступают элементы из верхних звеньев катен (содержание P_2O_5 в $A_{пах}$ до 400 мг/кг и более); в ее уменьшении на крутых склонах с маломощными смытыми агроземами, где, несмотря на внесение удобрений, обеспеченность растений доступными формами биогенов остается невысокой. В период покоса фитомасса трансаккумулятивных ландшафтов по сравнению с трансэлювиальными в посевах пшеницы выше в 2 раза (58,0 и 29,4 ц/га соотвентственно), ячменя (33,8 и 26,7 ц/га) и травосмесей (37,4 и 29,4 ц/га) в 1,3–1,5 раза. Это увеличивает различия однотипных фитоценозов и наиболее контрастно проявляется на стадии вегетации, когда фитомасса всходов злаков на шлейфах в 3,4 раза выше, чем на склонах (14,8 и 4,4 ц/га). Снижению продукции на аллювиальных террасах способствуют обеднение пахотных почв биогенными элементами и вымокание посевов по понижениям из-за застоя талых и дождевых вод. Например, фитомасса посевов ячменя перед покосом достигает лишь 6,4–7,2 ц/га.

Наряду с показателями активности автотрофного биогенеза количество отчуждаемых с урожаем минеральных веществ зависит от зольности, фило- и онтогенетической специализации культурных растений, фазы их развития. Оно меняется от 0,4 до 4,8 ц/га (C_v = 0,52%), обнаруживая сильную прямую связь с фитомассой (коэффициент корреляции равен 0,89). Зольность вегетативных органов фуражных зерновых культур перед покосом в среднем составляет 7,2%, но у ячменя выше, чем у пшеницы (7,9 и 6,6% соответственно). В этот период зольность колосьев меньше (5,5%), что связано с прерыванием онтогенеза этих культур на стадии молочной спелости. Одним из следствий сокращения времени активного продукционного процесса может быть сохранение в почвах доступных форм биогенных элементов, что создает предпосылки для включения их в водный сток.

В травосмесях зольность листьев и стеблей злаков (овес, тимофеевка, ежа сборная и др.) и бобовых (горошек посевной, вика и др.) составляет в среднем 7,1–7,6%, однако отмечается ее изменение в зависимости от фазы развития растений. Увеличение накопления минеральных веществ (до 9,7%) зафиксировано у всходов злаков в начальный период вегетации, когда стратегия растений направлена на продуцирование фитомассы и перевод питательных веществ в вегетативные органы. Это согласуется с данными В. Лархера [1978] о балансе ассимилятов у однолетних и многолетних травянистых растений в фазе роста. Запас зольных элементов в фитомассе фуражных зерновых культур составляет (ц/га) от 1,2 до 4,8; у травосмесей – 1,6–3,4; у посевов клевера – 3,2–4,3. При севообороте травосмеси клевера с тимофеевкой включаются в трехлетний цикл. С течением времени происходит изреживание посевов, уменьшение доли бобовых и снижение запаса зольных элементов до 0,56–1,6 ц/га. Таким образом, возраст многолетних кормовых культур – один из факторов увеличения вариабельности биогеохимических параметров в агроландшафтах.

Активность к накоплению микроэлементов у злаков (БХА 32,8–37,6) ниже, чем у бобовых, особенно у клевера посевного в монодоминантных посевах (БХА до 45,4). Накопление микроэлементов у бобовых в травосмесях меньше (до 35,7), чем у клевера; это может быть связано с их статусом в сообществе и усилением конкуренции с другими видами. Тенденция к увеличению БХА (в отличие от зольности) у злаков прослеживается не только на ранних стадиях развития, но и на этапе молочной спелости, причем с последующим увеличением перевода микроэлементов в колосья. Например, БХА колосьев овса в травосмесях (38,4–38,6) выше, чем в вегетативных органах. В посевах агрокультур повышенной зольностью и БХА отличается сорное разнотравье (11,7%; БХА=63,9) и хвощ полевой (14,8%; БХА=51,9). Из-за малой фитомассы их вклад в вовлечение зольных элементов в БИК невелик, но увеличивается при высокой засоренности посевов, их разреженности на крутых склонах, а также на незасеянных полях, где не проводится вспашка под пар.

В рядах биологического поглощения агроценозов наряду с фосфором, поступающим в почвы при внесении удобрений, к элементам сильного накопления (КК=10n) относятся B, Mo, среднего накопления (КК=n) – Ag, Cu, Zn, слабого накопления и среднего захвата (КК=0,n) – Ba, Sr, Mn (табл. 1). Активное поглощение анионогенных и пониженное катионогенных элементов не согласуется с филогенетической специализацией (Ba, Zn, Mn) гумидокатных видов, характерных для фоновых среднетаежных ландшафтов [Авессаломова, 2012]. Изменение концентрационной способности растений связано со снижением подвижности катионогенных и увеличением доступности анионогенных элементов при близком залегании карбонатных пород, особенно в трансэлювиальных ландшафтах, где они обнажаются при ускоренной эрозии. В то же время известно о подвижности фосфатов в ландшафтах Н-класса [Касимов, 2013]. Это определяет их включение в БИК на аллювиальных террасах, где выше кислотность пахотных горизонтов. Другими причинами снижения КК катионогенных элементов могут быть антагонистическое действие Ca и P по отношению к Mn, Ba, Zn, Cu, конкуренция между Cu и Zn, Mo и Cu и другие варианты их ингибирования [Kabata-Pendias, Pendias,1999]. Поглощение P, B, Mo сельскохозяйственными культурами и отчуждение с урожаем определяет их потерю в агроландшафтах. Так, запас P в фитомассе посевов клевера, отличающегося высокой биогенностью по отношению к этому элементу, составляет в среднем 0,12–0,13 ц/га и варьирует в зависимости от урожайности и положения в катене. Включение в водную миграцию, несмотря на существование латеральных биогеохими-

Таблица 1

Ряды биологического поглощения микроэлементов в агроландшафтах и таежных лесах

Названия растений и их систематических групп	Кларки концентрации микроэлементов в золе растений		
	10*n*	*n*	0,*n*
Полевые культуры агроценозов			
Клевер посевной и бобовые в травосмесях (листья и стебли)	B, Mo	Ag, Cu, Zn, Sr	Ba, Mn, Pb, Ni
Пшеница, ячмень и злаки в травосмесях (листья и стебли)	Mo	B, Cu, Ag, Zn	Ba, Pb, Mn, Sr
Материковые залежные луга			
Разнотравье	B (Mo)	Mo, Ag, Ba, Zn, Cu	Sr, Mn, Pb, Ni
Бобовые	B, Mo	Ag, Cu, Zn	Sr, Pb, Ba, Mn, Ni
Злаки	Mo	Ag, B, Zn, Cu (Mn)	Mn, Ba, Sr, Pb, Ni
Высокотравные луга пойм и пролювиальных конусов			
Разнотравье	B (Ag)	Ag, Mo, Zn, Ba, Cu (Mn)	Mn, Sr, Pb, Ni,
Бобовые	B, Ag, Mo	(Mo) Zn, Cu	Sr, Mn, Pb, Ba, Ni
Злаки	Mo	B, Ag, Zn, Cu (Mn)	Mn, Pb, Ba, Sr, Ni
Осоки	–	B, Zn, Mn, Ag, Cu, Ba, Mo	Pb, Sr, Ni
Травяной покров в ландшафтах среднетаежных лесов			
Разнотравье	B, Ag (Mn)	Mn, Cu, Zn, Ba, Sr (Mo)	Pb, Mo, Ni, Co
Злаки	Ag (Mn)	Mn, B, Cu, Zn, Ba, Mo	Pb, Sr
Осоки	Ag	Mn, B, Zn, Cu, Mo	Pb, Sr, Ba, Ni

Примечания: в скобках – индексы элементов, меняющих положение в рядах.

ческих барьеров в подчиненных звеньях катен, не исключает потери биофилов с речным стоком.

Биогеохимическое разнообразие лугов. В структуре экологического каркаса агроландшафтов наряду с лесами, частично сохранившимися на междуречьях и склонах долин, наибольшую площадь занимают луга. Это материковые залежные луга и высокотравные луга пойм [Емельянова и др., 1999]. Залежные луга находятся на разных стадиях восстановительных сукцессий, что увеличивает вариабельность фитомассы: в разных частях катен она меняется от 5,4 до 67,4 ц/га (C_v = 0,80), а на высокотравных лугах варьирует от 26,8 до 74,4 ц/га (C_v = 0,55). Соседство агроценозов с лугами вызывает увеличение биогеохимической контрастности катен. Это связано с разнообразием лугов, усложнением фракционной структуры фитомассы в зависимости от флористического богатства, присутствия видов с разной зольностью и филогенетической специализацией (табл. 2). Зольность фракций травянистой фитомассы лугов уменьшается при переходе от разнотравья (в среднем 8,2–10,9%) и бобовых (7,3–7,8%) к злакам и осокам (в среднем 5,7–6,7%). Ее вариабельность прослеживается у разных фракций травяного покрова, но наиболее четко для разнотравья. Основной тренд отражает изменение зольности в зависимости от положения в катене и связей с агрогенными и постагрогенными комплексами.

Наибольшей зольностью отличается разнотравье материковых залежных лугов в верхних и средних звеньях катен (10,7%), использовавшихся ранее под пашню, а также на днищах сухих логов (11,3%), расположенных на южных склонах среди полей. В нижних звеньях катен зольность разнотравья высокотравных лугов по днищам влажных логов (9,2%) и наложенных на пойму пролювиальных конусов (8,7%), куда в результате линейной эрозии поступает вещество с полей, выше, чем на поймах (6,2–8,2%), не имеющих с ними непосредственного контакта. Такая тенденция согласуется с изменением зольности одного из доминантов высокотравных лугов – таволги вязолистной как индикатора проточного увлажнения. Наименьшее накопление минеральных веществ зафиксировано в супераквальных ландшафтах фоновых территорий (6,2%), а некоторое увеличение – в поймах рек в пределах агроландшафтов

Таблица 2

Зольность различных фракций травянистой фитомассы лугов (по данным 150 проб)

Название и приуроченность лугов	Средняя зольность, %/число проб				
	разнотравье	бобовые	злаки	осоки	хвощи
Материковые луга залежей и сухих логов	10,9/26	7,3/14	6,3/29	–	–
Высокотравные луга конусов и влажных логов	8,9/17	7,8/12	6,7/11	5,7/5	17,5/5
Высокотравные пойменные луга	8,2/18	–	5,9/11	6,4/2	

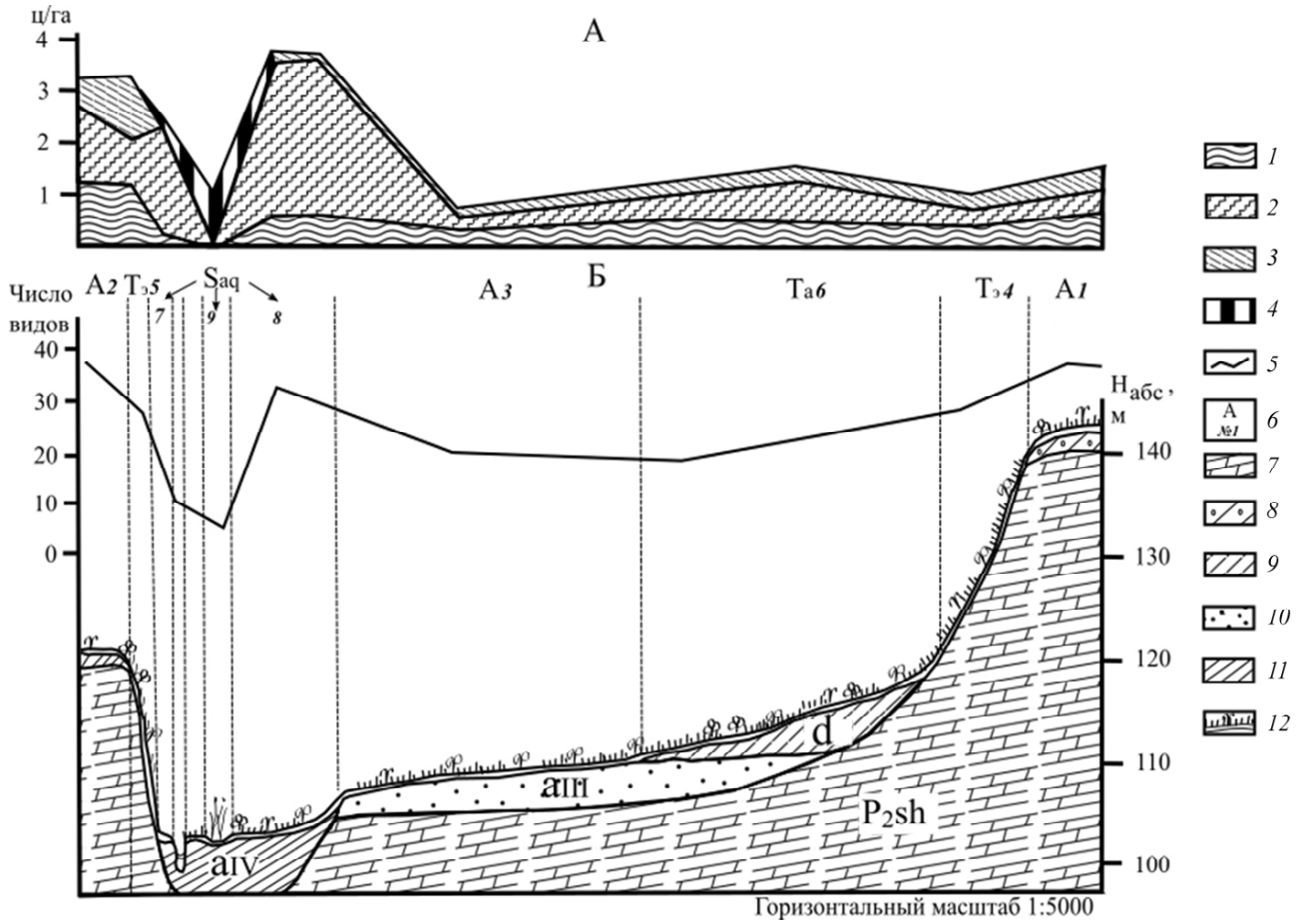

Рис. 2. Биогеохимические параметры залежных лугов в гетеролитной постагрогенной катене (1997 г.)

А – запас зольных элементов и их распределение по фракциям травянистой фитомассы лугов: *1* – злаки, *2* – разнотравье, *3* – бобовые, *4* – осоки, *5* – число видов травянистых растений в луговых фитоценозах;

Б – гетеролитная постагрогенная катена: *6* – индексы и номера элементарных ландшафтов: *автономные*: А*1* – структурное плато, сложенное мергелями, перекрытыми маломощной мореной, с клеверово-разнотравно-злаковыми залежными лугами на выщелоченных дерново-карбонатных почвах, Н-Са-класс; А*2* – высокая цокольная терраса с бобово-злаково-разнотравными лугами на маломощных выщелоченных дерново-карбонатных почвах, Н-Са-класс; А*3* – низкая цокольно-аккумулятивная терраса с разнотравно-полевицевыми залежными лугами на иллювиально-железистых подзолах, Н-класс; *трансэлювиальные*: Тэ*4* – коренные склоны, сложенные мергелями, с бобово-разнотравно-злаковыми залежными лугами на смытых дерново-карбонатных почвах, Са-класс; Тэ*5* – склоны цокольных террас с разнотравно-злаково-бобовыми лугами на дерново-карбонатных почвах, Са-класс; *трансаккумулятивные*: Та*6* – шлейф, наложенный на цокольно-аккумулятивную террасу, с злаково-бобово-разнотравными залежными лугами на выщелоченных дерново-карбонатных почвах, Н-Са-класс; *супераквальные*: Saq*7* – пролювиальный конус, наложенный на пойму, с разнотравно-таволговыми лугами на перегнойно-глеевых почвах, Н-Са-Fe-класс; Saq*8* – пойма с бобово-богаторазнотравно-злаковыми лугами на пойменных аллювиальных дерновых слоистых почвах, Н-класс; Saq*9* – старичное понижение с осоковыми лугами на пойменных дерново-глеевых почвах, Н-Fe-класс.

Породы и отложения: *7* – пермские мергели, *8* – моренные суглинки, *9* – щебнистые делювиальные суглинки, *10* – аллювиальные пески, *11* – аллювиальные суглинки, *12* – почвы и фитоценозы

Fig. 2. Biogeochemical parameters of fallows in heterolithic postagrogeic catena (1997):

A – storage of ash elements and their distribution over the fractions of meadow phytomass: *1* – grass, *2* – motley grass, *3* – legumes, *4* – sedges, *5* – number of grass species in meadow phytocoenoses;

Б – heterolithic postagrogenic catena: *6* – indices and numbers of elementary landscapes: *autonomous*: *A1* – structural plateau formed by marls overlain by thin moraine bed, with clover-motley grass-grass fallow meadows on leached sod-carbonate soils, H-Ca-class; *A2* – high erosional terrace, with legume-grass-motley grass meadows on thin leached sod-carbonate soils, H-Ca-class; *A3* – low erosional-accumulative terrace, with motley grass-bent grass fallow meadows on illuvial-ferruginous podzolic soils, H-class*; transeluvial*: *Te4* – bedrock slopes composed by marls, with legume-motley grass-grass fallow meadows on removed sod-carbonate soils, Ca-class; *Te5* – slopes of erosional terraces, with motley grass-grass-legume meadows on sod-carbonate soils, Ca-class; *transaccumulative*: *Ta6* – fan overlying the erosional-accumulative terrace, with grass-legume-motley grass fallow meadows on leached sod-carbonate soils, H-Ca-class; *superaquatic*: *Saq7* – proluvial fan over the flood-plain, with motley grass-spirea meadows on humus-gley soils, H-Ca-Fe-class; *Saq8* – flood-plain with legume-rich motley grass-grass meadows on flood-plain alluvial turfy laminated soils, H-class; *Saq9* – oxbow depression with sedge meadows on flood-plain sod-gley soils, H-Fe-class.

Rocks and sediments: *7* – Permian marls; *8* – moraine loams; *9* – gravelly deluvial loams; *10* – alluvial sands; *11* – alluvial loams; *12* – soils and phytocoenoses

(>6,4%). Выделяются днища логов, выходящие на пойму конуса и нижние части делювиальных шлейфов (7,1–7,7%). Максимальная зольность таволги в подчиненных комплексах достигает 9,4–9,5%. В таких комплексах увеличивается зольность и других видов (у бобовых до 7,8, злаков до 7,6, хвощей до 17,5%).

В накоплении микроэлементов основную роль играют разнотравье и бобовые (БХА до 52,4); для сравнения – у злаков и осок БХА=40,4. Увеличение БХА в нижних звеньях агрокатен прослеживается у разных видов, в том числе у хвощей на высокотравных пойменных лугах (БХА=67,6). Парагенные ассоциации элементов в фитомассе залежных лугов и агроценозов сходны (активное накопление B и Mo бобовыми и разнотравьем, снижение поглощения B у злаков и др.). Различия заключаются в переходе Mn в группу элементов биологического накопления на высокотравных лугах (табл. 1). Тенденция к увеличению БХА у растений в подчиненных ландшафтах высокотравных лесных пойм и по днищам логов по сравнению с автономными ландшафтами прослеживается и на фоновых территориях: у разнотравья – от 35 до 40, у хвощей – от 31 до 61. Такой тренд проявляется при общем более низком уровне содержания микроэлементов, снижении КК Mo и B, увеличении КК Ag и Mn по сравнению с агроландшафтами. Наиболее контрастно это выражено у бобовых, БХА которых снижается до 13,5. Изменение активности к поглощению элементов на фоновых территориях свидетельствует о более низкой емкости фитобарьеров в травяном покрове подчиненных ландшафтов.

При снятии антропогенной нагрузки меняется интенсивность автотрофного биогенеза в ходе сукцессионных смен. За 15 лет (1997–2011) выявлены тренды этих изменений при сопоставлении биогеохимических параметров материковых залежных лугов и лугов, использовавшихся как сенокосы. В первый год после прекращения распашки (1997) разнообразие постагрогенных катен проявлялось в сочетании лугов, различающихся по флористическому богатству и активности вовлечения элементов в БИК (рис. 2). Высокими фитомассой (32–41 ц/га) и запасом зольных элементов (3,2–3,6 ц/га) отличались луга, занимающие противоположное положение в катенах, – бобово-злаково-разнотравные луга автономных ландшафтов высоких цокольных террас и пойменные богато-разнотравно-злаковые луга в сочетании с бедными в видовом отношении таволжатниками на конусах. На коренных склонах, низких террасах и делювиальных шлейфах на месте пашен появились бобово-разнотравно-злаковые сообщества, сохраняющие в составе клевер посевной, но отличающиеся обилием сорных видов, замоховелостью и снижением запаса зольных элементов (1,0–1,6 ц/га). Самые низкие фитомасса и запас минеральных веществ (5–9 ц/га и <1 ц/га соответственно) отмечены на крутых выпуклых склонах и песчаных террасах у разнотравно-полевицевых лугов с признаками деградации – снижением высоты трав, проективного покрытия, мозаичностью фитоценозов, появлением напочвенных лишайников. В нижних звеньях уменьшение продукции характерно для осоковых лугов в старичных понижениях. Микроэлементный состав фитомассы зависит от соотношения видов с разной специализацией – накопление B и Mo при увеличении роли бобовых и разнотравья, активное поглощение Mn при доминировании осок в супераквальных ландшафтах H-Fe-класса.

Основные тренды трансформации лугов за 15 лет разные и зависят от их положения в катенах (рис. 3). Увеличение фитомассы при сохранении большого видового разнообразия (67,4 ц/га, 22–37 видов) характерно для бобово-злаково-разнотравных лугов высоких террас. Они сохранились частично и занимают экотонное положение между агроценозами и луговолесными комплексами, где возникли своеобразные фитоценозы, включающие полевые, луговые и лесные виды, а также экспреленты и сорняки. Их фитомасса в 2,5 раза больше, чем на соседних полях с ячменем (17,3–33,8 ц/га), т.е. в монодоминантных культурных посевах не полностью реализуются потенциальные возможности биопродукционного процесса. На пойменных лугах после прекращения сенокошения отмечается рост фитомассы при снижении видового разнообразия (с 41,8 до 67,7 ц/га и с 32 до 10 видов), потере хорошо поедаемых видов, экспансии таволги вязолистной и щучки дернистой. Повышение фитомассы на осоковых лугах (с 23 до 51 ц/га) связано с увеличением высоты и проективного покрытия крупных осок. Наиболее стабильна ситуация на пролювиальных конусах, где сохранились таволговые луга. Уменьшение фитомассы и флористического богатства лугов на коренных склонах, шлейфах и низких террасах (с 16–20 до 9–14 ц/га и с 28–36 до 13–17 видов) свидетельствует о продолжающейся деградации травяного яруса, которая сочетается с появлением поросли древесных пород. Значения коэффициента латеральной дифференциации травянистой фитомассы в разные годы отражают увеличение биогеохимической контрастности катен в связи с разными тенденциями преобразования при снятии агрогенной нагрузки.

Увеличению разнообразия лугов способствуют эрозионное расчленение агроландшафтов и появление неполных сопряжений с конечным звеном на днищах логов с высокой и средней степенью обеспеченности P и K органогенных горизонтов почв [Авессаломова, 2014]. На распаханных южных склонах днища логов заняты сухими разнотравно-овсяницево-тимофеевковыми лугами. Преобладание во фракционной структуре фитомассы злаков над разнотравьем (31,2 и 2,0 ц/га) и их невысокая зольность (3,6–5,5%) определяют снижение запаса элементов (1,6–1,9 ц/га) и снижение накопления B. Днища логов северных склонов отличаются соседством фитоценозов, флористический состав которых меняется с увеличением гидроморфности и трофности. Основной тренд при переходе от суходольных разнотравно-злаковых лугов в верховьях логов – увеличение активности биопродукционного процесса, особенно при появлении таволги вязолистной (фитомасса возрастает с 18,8 до 44,0 ц/га и более, за-

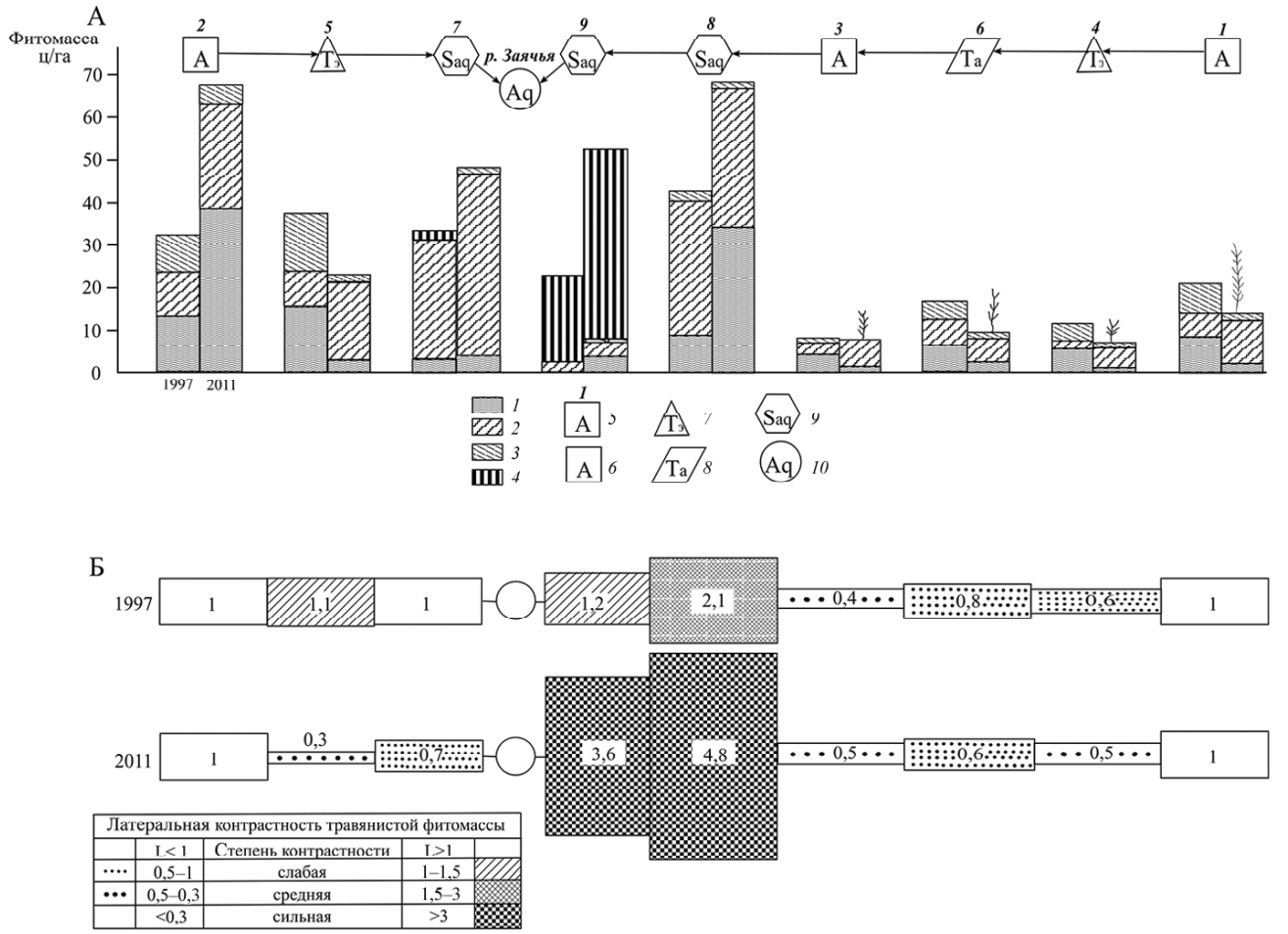

Рис. 3. Изменение фитомассы залежных лугов в гетеролитной постагрогенной катене за 15 лет.

А – сопоставление фракционной структуры травянистой фитомассы лугов в 1997 и 2011 г. Надземная травянистая фитомасса лугов: *1* – злаки, *2* – разнотравье, *3* – бобовые, *4* – осоки; *5* – индексы и номера элементарных ландшафтов (даны в соответствии с рис. 2; для каждого элементарного ландшафта: левый столбик – 1997 г., правый – 2011 г.): *6* – автономные (А*1,2,3*), *7* – трансэлювиальные (Тэ*4,5*), *8* – трансаккумулятивные (Та*6*), *9* – супераквальные (Saq*7,8,9*), *10* – аквальные (Aq, р. Заячья);

Б – значения коэффициента латеральной дифференциации травянистой фитомассы и степень ее контрастности

Fig. 3. Variations of the fallow meadow phytomass in heterolithic postagrogenic catena during 15 years.

A – Correlation of the fraction structure of the meadow grass phyto6mass in 1997 and 2011. Overground meadow grass phytomass: *1* – grasses; *2* – motley grasses; *3* – legumes; *4* – sedges; *5* – indices and numbers of elementary landscapes (as in Fig. 2; for every elementary landscape: left column – 1997, right column – 2011): *6* – autonomous (A*1,2,3*), *7* – transeluvial (Te*4,5*), *8* – transaccumulative (Ta*6*), *9* – superaquatic (Saq*7,8,9*), *10* – aquatic (Aq, Zayach'ya River);

Б – Coefficient value of the lateral differentiation of plant phytomass and the degree of its variability

пас зольных элементов с 1,9 до 4,0 ц/га). В нижней части логов появляются пролювиальные конусы с высокотравными злаково-таволговыми и таволговыми лугами (фитомасса до 80,0 ц/га, запас зольных элементов до 7,4 ц/га).

По сравнению с агроценозами растения высокотравных лугов проявляют меньшую активность к поглощению Mo, который переходит в группу элементов среднего накопления. У разнотравья и осок увеличивается поглощение Mn. Тем не менее по парагенным ассоциациям видно, что активность к поглощению анионогенных (P, Mo, B) и катионогенных (Zn, Cu, Ba) элементов на высокотравных лугах в нижних звеньях катен продолжает оставаться высокой. В сочетании с увеличением продукции это определяет их концентрационные функции при формировании латеральных фитобарьеров. Сохранившиеся массивы лесов выделяются не только по параметрам автотрофного биогенеза, но и сохраняют филогенетическую специализацию гумидокатных видов. Например, в хвое елей и сосен поглощение Mn (КК до 10) выше, чем Mo, переходящего в группу элементов биологического захвата. Соседство полей с разнотипными ландшафтами и связанные с этим изменения фитомассы и специфики поглощения элементов обеспечивают разнообразие фитобарьеров в зависимости от структуры агроландшафтных катен.

Выводы:

– структурно-функциональная организация агроландшафтов определяется совместным действием природных и антропогенных факторов, способствующих как снижению, так и увеличению разнообразия биогеохимических структур в связи с соседством агрогенных и постагрогенных катен с естественными комплексами экологического каркаса. Агроценозы различаются по активности биогенеза, филогенетичес-

кой специализации и включению зольных элементов в БИК. В гетеролитных катенах смена культур в севообороте и изменение их продукции в результате перераспределения биогенных элементов при ускоренной эрозии сопровождаются увеличением вариабельности биогеохимических параметров агроландшафтов;

– противоречивость функционирования постагрогенных ландшафтов проявляется в разнонаправленности изменения биогеохимических параметров в разных частях катен и усилении положительных обратных связей, способствующих перестройке бывших угодий при суцессионных сменах. Ослабление самоорганизации при снижении продукции и видового разнообразия характерно для деградирующих материковых лугов крутых склонов и песчаных террас. При трансформации бывших сенокосов на поймах одновременно проявляются тенденции к усилению самоорганизации с ростом продукции и ее ослаблению в связи со снижением видового разнообразия. Их соседство с материковыми лугами увеличивает биогеохимическую контрастность катен при снятии агротехногенных нагрузок;

– биогеохимическая неоднородность агроландшафтов усиливается за счет различной активности фитоценозов к накоплению микроэлементов. Карбонатность субстрата и высокое содержание в пахотных горизонтах фосфора стимулируют (в том числе за счет антагонистических взаимодействий) накопление в травяном покрове анионогенных элементов (P, B, Mo) и снижение катионогенных (Mn). По степени изменения парагенных ассоциаций в сравнении с типичными для среднетаежных лесов выделяются агроценозы и залежи. Промежуточное положение занимают высокотравные луга пойм и пролювиальных конусов, выполняющие роль латеральных фитобарьеров по ограничению потери биогенов в агроландшафтах.

Благодарности. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14–05–00170 «Условия возникновения цепных реакций на внешнее воздействие в географическом ландшафте»).

В полевых работах принимали участие научный руководитель гранта доцент А.В. Хорошев и К.А. Мерекалова, которым выражаю глубокую признательность за помощь при проведении геохимического опробования и возможность получения аналитических данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Авессаломова И.А. Катенарная геохимическая организация таежных ландшафтов Восточно-Европейской равнины // Геохимия ландшафтов и география почв. М.: АПР, 2012. С. 97–117.

Авессаломова И.А. Ландшафтное соседство как фактор трансформации латеральных потоков в геосистемах // Вопросы географии. Сб. 138. Горизонты ландшафтоведения. М.: Изд. дом «Кодекс», 2014. С. 233–250.

Баргальи Р. Биогеохимия наземных растений. М.: ГЕОС, 2005. 457 с.

Геохимия окружающей среды. М.: Недра, 1990. 335 с.

Глазовская М.А. Биогеохимическая организованность экологического пространства в природных и антропогенных ландшафтах как критерий их устойчивости // Изв. РАН. Сер. геогр., 1992. № 5. С. 5–12.

Глазовская М.А. Геохимия природных и техногенных ландшафтов. М., МГУ, 2007. 350 с.

Емельянова Л.Г., Горяинова И.Н., Мяло Е.Г. Жизнь тайги. М.; Архангельск, 1999. 163 с.

Касимов Н.С. Экогеохимия ландшафтов. М.: ИП Филимонов М.В., 2013. 208 с.

Лархер В. Экология растений. М.: Мир, 1978. 384 с.

Николаев В.А., Копыл И.В. Ландшафтная экология сельскохозяйственных земель // География, общество, окружающая среда. Т. II. Функционирование и современное состояние ландшафтов. М.: Изд. дом «Городец», 2004. С. 257–268.

Перельман А.И. Изучая геохимию…(О методологии науки). М.: Наука, 1987. 152 с.

Перельман А.И., Касимов Н.С. Геохимия ландшафта. М.: Астрея-2000, 1999. 768 с.

Kabata-Pendias A., Pendias H. Biogeochemistry pierwiastków śladowych. Warszawa: PWN, 1999. 398 s.

Поступила в редакцию 26.01.2016
Принята к публикации 18.03.2016

I.A. Avessalomova[1]

BIOGEO CHEMICAL HETEROGENEITY OF AGROLANDS CAPES (MIDDLE TAIGA SUBZONE OF THE SOUTHERN ARKHANGEL'SK REGION AS AN EXAMPLE)

Biogeochemical heterogeneity reflects the internal diversity of landscapes. For agrocoenoses and plant associations of ecological framework, we estimated the phytomass, nutrient supply and nutrient uptake intensity. After cessation of agricultural use, phytocoenoses experienced multidirectional changes along with increasing biogeochemical heterogeneity of postagricultural catenae.

Keywords: catena, agricoenosis, herb phytomass, biogeochemical activity of species, fallows, middle-taiga.

Acknowledgements. The study was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research (project N 14-05-00170). The author is thankful to A.V. Khoroshev and K.A. Merekalova for their assistance in geochemical sampling and analytical work.

[1] Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Physical Geography and Landscape Research, Associate Professor, PhD in Geography; *e-mail*: aiageo@yandex.ru

REFERENCES

Avessalomova I.A. Catenarnay geokhimicheskaya organizatsiya taezhnykh landshaftov Vostochno-Evropeiskoi ravniny [Catenary geochemical organization of taiga landscapes in East European Plain], Geokhimiya landshaftov i geografiya pochv. Moscow, APR, 2012, pp. 97–117 (in Russian).

Avessalomova I.A. Landshaftnoe sosedstvo kak faktor transformatsii lateral'nykh potokov v geosistemakh [Landscape neighborhood as a factor transforming lateral flows], Voprosy geografii, sbornik 138, Gorizonty landshaftovedeniya, Moscow., Izdatelskii dom «Kodeks», 2014, pp. 233–250 (in Russian).

Bargagli R. Biogeokhimiya nazemnix rastenii [Trace elements in terrestrial plants], Moscow, GEOS, 2005, 457 p. (in Russian).

Emel'yanova L.G.,Goryainova I.N.,Myalo E.G. Zhizn' taygi, [The leif of the taiga] Moscow; Arkhangel'sk, 1999, 163 p. (in Russian).

Geokhimiya okruzhayushchey sredy [Geochemistry of environment], M.: Nedra, 1990, 335 p. (in Russian).

Glazovskaya M.A. Biogeokhimicheskaya organizovannoct' ekologicheskogo prostranstva v prirodnykh i antropogennykh landshaftakh kak kriteriy ikh ustoychivosti [Biochemical organization of an ecological space in natural anthropogenic landscapes as a criterium of their stability], Izvestiya RAN, seria geograficheskaya, 1992, no 5, pp. 5–12 (in Russian).

Glazovskaya M.A. Geokhimiya prirodnykh i tekhnogennykh landshaftov [Geochemistry of natural and technogenic landscapes], Moscow, Geograficheskiy fakultet MGU, 2007, 350 p. (in Russian).

Kabata-Pendias A., Pendias H. Biogeochemistry pierwiastków śladowych. Warszawa: PWN, 1999. 398 s.

Kasimov N.S. Ekogeokhimiya landshaftov [Landscape Ecogeochemistry], Moscow. IP Filimonov M.W., 2013, 208 p. (in Russian).

Larcher W. Ekologiya rasteniy [Plant ecology], Moscow, Mir, 1978, 384 p. (in Russian).

Nikolaev V.A., Kopyl I.V. Landshaftnaya ekologiya sel'skokhozyaystvennykh zemel' [Landscape ecology of agricultural lands], Geografiya, obshchestvo, okruzhayushchaya sreda, T. II. Funktsionirovanie i sovpemennoe sostoyanie landshaftov, Moscow, Izdatel'skiy dom «Corodets», 2004, pp. 257–268 (in Russian).

Perel'man A.I. Izuchaya geokhimiyu…(O metodologii nauki) [Studying geochemistry… (about science methodology], Moscow, Nauka, 1987, 152 p. (in Russian).

Perel'man A.I., Kasimov N.S. Geokhimiya landshafta [Landscape geochemistry], Moskow, Astreya-2000,1999, 768 p. (in Russian).

Received 26.01.2016
Accepted 18.03.2016