

УДК 911.2:550.4

И.А. Авессаломова¹, К.Н. Дьяконов², А.В. Савенко³**ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ЛОВУШКИ НА ПУТИ ВОДНОЙ МИГРАЦИИ АНИОНОГЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ (НА ПРИМЕРЕ ТАЕЖНЫХ ЛАНДШАФТОВ ВОСТОЧНО-ЕВРОПЕЙСКОЙ РАВНИНЫ)⁴**

Проанализировано распределение анионогенных элементов (Cl, F, Si, P) в водах таежных ландшафтов Восточно-Европейской равнины. Выявлены факторы латеральной дифференциации подвижных форм рассмотренных элементов и различие их локализации в катенах. Установлена роль антропогенных факторов в изменении водной миграции биогенных элементов и отмечены предпосылки эвтрофикации водоемов.

Ключевые слова: водная миграция, анионогенные элементы, катена, геохимические барьеры, геохимические ловушки, латеральная дифференциация.

Введение. В теории и методологии геохимии ландшафтов важное место занимает концепция каскадных ландшафтно-геохимических систем, разработанная М.А. Глазовской и основанная на ведущей роли миграционных процессов в организации природных и антропогенно измененных ландшафтов. При формировании их миграционной структуры важная роль принадлежит водным потокам, с которыми связаны латеральное перераспределение элементов между автономными и гетерономными звеньями катен и их вынос с ионным стоком. В зависимости от соотношения выноса и аккумуляции вещества различаются открытые и замкнутые каскадные ландшафтно-геохимические системы, функционирование которых сопровождается рассеянием или концентрацией водных мигрантов [4]. Поскольку увеличение емкости выходных потоков создает предпосылки для нарушения устойчивости геосистем, необходим анализ процессов, определяющих изменение содержания элементов в водах и места их возможной локализации. В первую очередь это относится к биогенным элементам, участвующим в биологическом круговороте и влияющим на продуктивность ландшафтов. По М.А. Глазовской [5], возможность перехвата элементов из латеральных потоков увеличивается в супераквальных частях катен, где расположены биоценозы с повышенной требовательностью к влаге и элементам минерального питания, в частности таким специальным органогенам, как кремнезем, галогены и др. Потери с ионным стоком зависят от миграционной способности элементов, катенарной организации ландшафтов и наличия геохимических

ловушек на пути их водной миграции. Геохимическая ловушка — особый концентрационный механизм в миграционной структуре ландшафта. Такие ловушки приурочены преимущественно к подчиненным звеньям катен, где наряду с осаждением химических элементов в пределах барьерных зон происходит накопление их подвижных растворимых форм, в том числе очень подвижных водных мигрантов, не задерживающихся на геохимических барьерах. В отличие от геохимического барьера, подразумевающего аккумуляцию элементов в связи с потерей их подвижности, геохимическая ловушка предполагает также накопление элементов в растворимых формах, сохраняющих подвижность⁵.

Основная цель проведенных исследований состояла в выявлении факторов, формирующих распределение анионогенных элементов с различной биофильностью и интенсивностью водной миграции (Cl, F, Si, P) в водах таежных ландшафтов Восточно-Европейской равнины, различающихся по зональной приуроченности, литогенной основе, катенарной структуре и антропогенному воздействию.

По особенностям гипергенной миграции хлор относится к типично талассофильным элементам, имеет важное физиологическое значение (регулирует водно-солевой обмен, осмотическое давление и др.), обладает высокой биофильностью, активно участвует в водной миграции, не задерживается на биогеохимических и физико-химических барьерах и является циклическим элементом в гумидных ландшафтах, которые им обеднены. Интенсивность биогенной и водной

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра физической географии и ландшафтоведения, доцент, канд. геогр. н., e-mail: landrus@geogr.msu.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра физической географии и ландшафтоведения, зав. кафедрой, докт. геогр. н., чл.-корр. РАН, e-mail: diakonov.geofak@mail.ru

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геохимии, ст. науч. с., канд. геогр. н., e-mail: alla_savenko@rambler.ru

⁴ Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (проекты 11-05-00954 и 11-05-93105). В полевых работах принимали участие А.А. Прозоров, Е.В. Богатырева, Е.С. Славин.

⁵ При обсуждении понятия “геохимическая ловушка” и его соотношения с “геохимическим барьером” Н.С. Касимов обратил внимание на важность учета фактора времени. Справедливость этого утверждения связана, очевидно, с саморазвитием геохимических ловушек, которое может приводить к постепенной трансформации растворимых форм элементов и усилению барьерных эффектов.

миграции фтора ниже, отмечаются изменение его подвижности в зависимости от щелочно-кислотной обстановки и содержания в водах растворенного органического вещества, адсорбция положительно заряженными коллоидами, осаждение на щелочном и сорбционном барьерах, а также возможность миграции в составе комплексных соединений с элементами-гидролизатами [8, 10, 12]. Фосфор и кремний — слабобподвижные водные мигранты, но повсеместно содержащиеся в природных водах. Фосфор присутствует в водах в виде растворимых неорганических соединений, в составе дисперсного органического вещества, в минеральных взвешях; кремний — в истинно растворенных или коллоидных формах, причем при обогащении вод органическим веществом возможно увеличение его подвижности. Оба этих элемента включаются в биологический круговорот, хотя биофильность Р выше, чем Si. В гумидных ландшафтах Р дефицитен и часто ограничивает их продуктивность [6, 8, 13], тогда как повышение содержания биогенных элементов в водах способствует эвтрофикации водоемов. Наряду с установлением основных закономерностей миграции анионогенных элементов необходимо учитывать условия формирования ионного стока и включение этих элементов в водные потоки в ландшафтах с разной структурно-функциональной организацией.

Объекты и методы исследований. Основные объекты полевых исследований — ландшафты Двинско-Мезенской (Заячережье, бассейн р. Кокшеньга) и Мещерской (Озерная Мещера, бассейн р. Пра) физико-географических провинций. Среднетаежные ландшафты Двинско-Мезенской провинции представлены тремя родами. 1. Слабодренированные моренно-озерно-ледниковые равнины на склоне структурного столового плато; преобладают болотно-лесные катены: верховые болота → автономные и супераквальные ландшафты Н-Fe-класса с елово-сосновыми долгомошными и зеленомошными лесами на торфянисто-подзолистых почвах → мелкие ручьи в верховьях р. Заячь. 2. Моренно-эрозионно-озерно-ледниковые равнины в повышенной части столового плато, отличающиеся высокой геохимической контрастностью катен: автономные ландшафты Н-класса с агродерново-подзолистыми почвами → трансэлювиальные ландшафты Са- и Н-Са-класса с дерново-карбонатными почвами, формирующиеся на пермских мергелях → супераквальные лесные и луговые ландшафты с аллювиальными дерновыми и перегнойно-торфяными почвами на поймах в среднем течении р. Заячь и ее притоков; большая часть территории занята агроландшафтами. 3. Ложбина стока, к которой приурочена долина р. Кокшеньга, включающая автономные ландшафты аллювиально-зандровых террас Н-класса с лишайниковыми борами на подзолистых почвах и супераквальные ландшафты пойм с черноольшаниками на перегнойно-торфяных почвах и обилием заболоченных стариц [1, 15]. Для Озерной Мещеры характерны долинно-зандровые и озерно-зандровые

ландшафты сосновых лесов (полесский вид) с широким развитием лесо-болотных и лесо-лугово-болотных катен, в которых наряду с травяными мезотрофными и эвтрофными встречаются олиготрофные сфагновые болота [2, 7]. Кроме естественных встречаются также гидромелиорированные ландшафты (Вожская осушительная система).

Гидрохимическое опробование проводилось в летний период (июль 2009 г.) и включало отбор вод из рек, ручьев, озер, дренажных канав, а также из шурфов в супераквальных ландшафтах. Всего было отобрано 40 проб. Сразу после отбора проб выполняли их подготовку: для анализа содержания Cl, F и других ионов основного солевого состава пробы отфильтровывали через плотные бумажные фильтры; для анализа содержания Si и $P_{\text{мин}}$ после аналогичной фильтрации в пластиковые флаконы добавляли небольшое количество хлороформа (1 мл на 100 мл пробы). Концентрацию растворенных форм Cl и F определяли в лабораторных условиях объемным меркуриметрическим и потенциометрическим методами, Si и $P_{\text{мин}}$ — колориметрическими методами с применением молибдата аммония с солью Мора и молибдата аммония с аскорбиновой кислотой [11]. Поскольку большинство проб имело довольно сильную коричневатую окраску, значения концентрации Si и $P_{\text{мин}}$ вычисляли по разности светопоглощения между “окрашенными” и параллельными “холостыми” растворами, в которых создавались те же условия среды, но без добавления индикаторных реактивов. Определение величины общей щелочности выполняли объемным ацидиметрическим методом, концентрации ионов SO_4 , Na, K, Mg и Ca — методом капиллярного электрофореза. Относительная погрешность измерений не превышала $\pm 3\%$.

Пространственные различия минерализации и ионного состава вод исследуемых территорий отражают региональные особенности ландшафтов и трансформацию водных потоков в геохимических сопряжениях. Для Озерной Мещеры характерны пресные воды с малой минерализацией — от 17—21 мг/л на верховых болотах до 39—117 мг/л в супераквальных лесных, луговых и низинноболотных ландшафтах, реках и озерах. В грунтовых водах гидромелиорированных и селитебных ландшафтов минерализация возрастает до 194—227 мг/л. Трансформация ионного состава проявляется в смене сульфатно-кальциевых вод автономных и супераквальных комплексов с сосновыми лесами на гидрокарбонатно-кальциевые воды в нижних звеньях катен, что согласуется с литературными данными о ландшафтах зандрово-аллювиальных равнин [14]. В среднетаежных ландшафтах Заячережья ультрапресные воды верховых болот резко контрастируют по минерализации (3,5 мг/л) с гидрокарбонатно-кальциевыми водами слабодренированных равнин (109—136 мг/л) и гидрокарбонатно-кальциево-магниевыми речными и грунтовыми водами агроландшафтов столового плато (186—314 мг/л). Максимальная

минерализация (>1000 мг/л) характерна для вод бессточных стариц с высоким содержанием сульфатов.

Значения коэффициента латеральной дифференциации (L) растворенных форм анионогенных элементов в водах разных частей катен рассчитывали относительно автономных ландшафтов олиготрофных болот. Эти ландшафты отличаются высшей степенью автономности [13], что позволяет наиболее четко проследить трансформацию вод при движении от верхних, тесно связанных с аэральными потоками звеньев катен к гетерономным.

Латеральное распределение галогенов в водах. Содержание Cl и F в природных водах Озерной Мещеры и Заячережья отличается высокой вариабельностью (табл. 1), причем если пределы колебания Cl в обоих районах близки (коэффициент вариации $C_v = 64\div 65\%$), то концентрация F в водах Мещеры ($C_v = 48\%$) изменяется меньше, чем в Заячережье ($C_v > 70\%$).

В связи с дефицитом Cl в гумидных ландшафтах представляет интерес оценить возможность его накопления в гетерономных звеньях катен. Анализ полученных данных показал, что в полных геохимических сопряжениях в грунтовых водах супераквальных луговых ландшафтов с дерново-глеевыми почвами и болотных мочажинах Озерной Мещеры содержание Cl в среднем достигает $4,4$ мг/л и не отличается от такового в реках и проточных озерах. Это свидетельствует о совершенстве однонаправленных водных связей в пермацидных ландшафтах полесского вида, несмотря на замедленный водообмен. По сравнению с обобщенными среднестатистическими данными о содержании Cl в речных водах ($6,4$ мг/л [6]) его содержание в реках Озерной Мещеры ниже в связи с хорошей промытостью кварцевых песков и замедленным разложением органического вещества в гидроморфных комплексах.

На этом фоне выделяется ряд супераквальных ландшафтов с более высоким содержанием Cl . В лесоболотных катенах к ним относятся краевые зоны болот с сосново-еловыми лесами на торфянисто-подзолисто-глеевых почвах, где увеличение концентрации Cl в грунтовых водах (до $6,6$ мг/л) обусловлено не только его привнесом из автономных ландшафтов, но и повышенным поступлением с атмосферными осадками, поскольку установлено, что при прохождении осадков через кроны сосны и ели содержание Cl возрастает в $5\text{—}30$ раз [14]. В неполных геохимических сопряжениях своеобразными геохимическими ловушками служат замкнутые понижения с осоковыми болотами. Условия для накопления Cl создаются и в аквальных ландшафтах. В Озерной Мещере наряду с проточными встречаются крупные бессточные озера, представляющие собой конечное звено геохимических сопряжений и аккумуляторы очень подвижных мигрантов, поступающих с потоком грунтовых вод. К таким озерам относится, например, оз. Белое, в водах которого содержание Cl на порядок выше ($14\text{—}15$ мг/л) по сравнению с водами рек и проточных озер (рис. 1).

Своеобразная трансформация условий водной миграции наблюдается в долинно-зандровых ландшафтах, включающих гидромелиорированные комплексы. Поскольку Вожская система находится в стадии деградации, дренажные каналы и принимающая их вода р. Вожа превратились в стоячие водоемы с крайне замедленным водообменом. Индикатором повышенного содержания Cl ($6,6\text{—}7,2$ мг/л) в их водах служит бурное развитие ряски — его типичного концентратора, накапливающего в листьях десятки доли процента Cl [9]. Локальный рост содержания Cl ($7,0$ мг/л) зафиксирован также в заболачивающихся замкнутых понижениях на мелиорированных землях. Возможность его

Таблица 1

Содержание растворенных форм Cl и F в поверхностных и грунтовых водах (по данным 40 проб)

Ландшафтная приуроченность точек отбора вод	Индекс элементарных ландшафтов	Содержание подвижных водных мигрантов, мг/л			
		Мещера		Заячережье	
		Cl	F	Cl	F
Автономные верховых и переходных сфагновых болот (Н- и Н-Fe)	$Авт_в$	$4,6\text{—}4,9$	$0,06\text{—}0,09$	$3,3\text{—}7,9$	$0,01$
Супераквальные хвойнолесные (Н-Fe)	$СА_л$	$6,6$	$0,12$	$2,0$	$0,17$
Супераквальные луговые и низинноболотные (Н-Fe)	$СА_{лу}$ и $СА_{ноб}$	$3,3\text{—}4,9$	$0,22\text{—}0,39$	—	—
Супераквальные гидромелиорированные болотно-луговые (Н-Fe)	$СА_г$	$4,6\text{—}6,9$	$0,29\text{—}0,33$	—	—
Трансаквальные рек и ручьев	$ТА_р$	$3,6\text{—}7,2$	$0,19\text{—}0,24$	$2,0\text{—}12,5$	$0,01\text{—}0,21$
Трансаквальные дренажных канав	$ТА_д$	$4,6\text{—}7,2$	$0,14\text{—}0,24$	—	—
Аквальные непроточных озер и стариц	$А_о$ и $А_с$	$4,9\text{—}15,4$	$0,08\text{—}0,15$	$3,9\text{—}197,6$	$0,04\text{—}0,51$
Грунтовые воды родников и колодцев	$Гр$	$19,7$	$0,10$	$2,0\text{—}5,6$	$0,11\text{—}0,22$

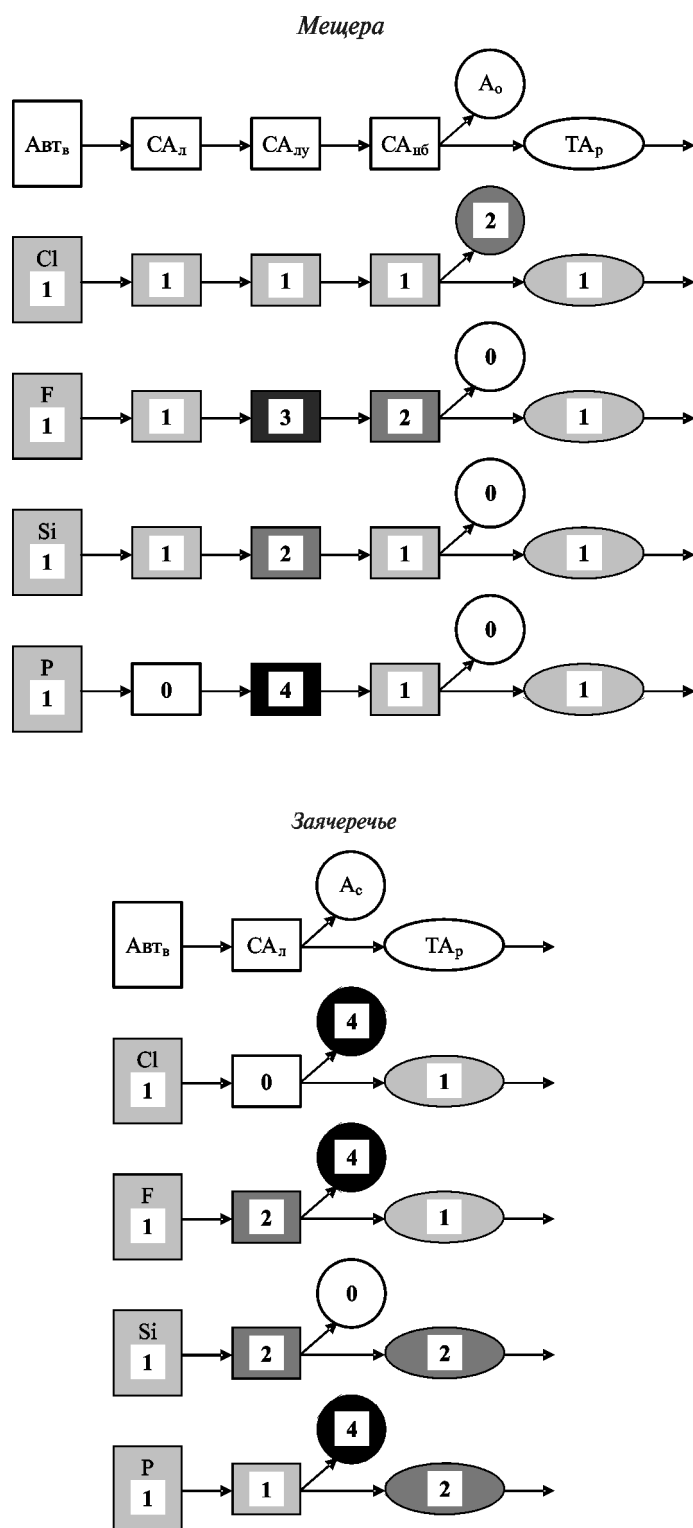


Рис. 1. Латеральная дифференциация растворенных форм аниогенных элементов в поверхностных и грунтовых водах. Индексы элементарных ландшафтов соответствуют приведенным в табл. 1 и 2. Коэффициент латеральной дифференциации (L) аниогенных элементов в водах: 0 — <1 ; 1 — 1–3; 2 — 4–6; 3 — 7–10; 4 — >10

накопления в грунтовых водах увеличивается в населенных пунктах, где в связи с дополнительным поступлением с бытовыми стоками в одном из деревенских колодцев зафиксированы максимальные значения минерализации (227 мг/л) и концентрации Cl (19,7 мг/л).

Тенденции латерального распределения Cl и F в Озерной Мещере различны. По сравнению с водами сфагновых болот, где содержание F минимально (0,06–0,09 мг/л), по пути движения водного потока к гетерономным звеньям катен формируется зона повышенного содержания этого элемента, совпадающая с ростом pH и концентрации $C_{орг}$ в водах супераквальных ландшафтов. Неоднородность этой зоны проявляется в максимальном накоплении F в водах луговых комплексов (0,3–0,4 мг/л), окаймляющих болотные массивы, и последовательном уменьшении его содержания в низинных болотах и питаемых ими речных водах (0,2–0,3 мг/л). Задержка F в краевых зонах болот снижает не только его потерю с поверхностным и грунтовым стоком, но и накопление в бессточных озерах (0,08–0,15 мг/л). Различие поведения элементов в процессе водной миграции отражается на соотношении F/Cl в водах разных частей геохимических сопряжений (рис. 2). Оно увеличивается при локализации F в луговых ландшафтах (до 0,1) и наиболее резко снижается при ограничении его поступления в бессточные озера (до 0,008), представляющие собой накопители Cl.

Изменение миграционной структуры и условий формирования стока в среднетаежных ландшафтах разных родов определяет пространственные различия содержания Cl и F в речных водах Заячережья. Общая тенденция заключается, во-первых, в снижении концентрации этих элементов в болотно-лесных катенах слабодренированных равнин при поступлении в ручьи и озера маломинерализованных вод верховых болот, а во-вторых, в увеличении их содержания в агроландшафтах столового плато, где в питании рек принимают участие подземные воды пермского водоносного комплекса с повышенным содержанием Cl и других ионов, а также хозяйственно-бытовые стоки населенных пунктов и животноводческих комплексов. Наиболее резко эти различия проявляются для F: его среднее содержание в речных водах ландшафтов 1-го и 2-го рода в бассейне р. Заячья меняется на порядок (0,04 и 0,2 мг/л соответственно). При этом увеличение содержания F фиксируется вне зависимости от снижения кислотности вод при близком залегании карбонатных пород. Кроме того, отсутствие низинных болот и окружающей их полосы лугов в структуре катен не ограничивает водную миграцию F в среднетаежных ландшафтах, как это отмечено для Озерной Мещеры. Исключение составляют поймы с осиново-еловыми лесами, на которых в мочажинах притеррасных понижений накапливается до 0,2 мг/л F. Основные геохимические ловушки для обоих элементов — старицы. Так, наибольшее содержание Cl (197,6 мг/л) и F (0,5 мг/л) обнаружено в покрытых ряской водах зарастающих бессточных стариц на высокой пойме р. Кокшеньга. По сравнению с верховыми олиготрофными болотами водораздельных равнин в этих субаквальных ландшафтах содержание Cl увеличивается в 60, а F — в 50 раз (рис. 1), что свидетельствует

об их активном накоплении в локальных аккумуляторах — конечных водоемах, теряющих связь с флювиальными потоками.

Водная миграция слабоподвижных аниогенных элементов. Содержание $P_{\text{мин}}$ и Si в водах таежных ландшафтов, несмотря на более низкую миграционную способность по сравнению с галогенами, изменяется в широких пределах, особенно $P_{\text{мин}}$, концентрация которого различается на 1–2 порядка (табл. 2).

В ландшафтах Мещеры латеральное распределение Si в водах недостаточно контрастно, а его содержание достигает 2–4 мг/л (рис. 3). Однако сочетание факторов, определяющих поступление Si в воды, в разных частях лесо-лугово-болотных катен неодинаково. На верховых и переходных болотах медленное разложение сфагнов замедляет высвобождение Si, закрепляя его на биогеохимическом барьере в торфах, хотя увеличение растворимости SiO_2 в сильнокислой среде способствует включению Si в водную миграцию. В соответствии с филогенетической специализацией хвойных пород и большинства доминантов лугов и низинных болот (злаки, осоки, мхи, хвощи) в супераквальных комплексах Si активно включается в биологический круговорот и при разложении органических остатков поступает в воды. Дополнительное аэральное поступление Si в природных комплексах с елово-сосновыми лесами происходит за счет увеличения содержания водорастворимых веществ при трансформации атмосферных осадков кронами деревьев и выщелачивания Si из хвои [14]. Это одна из причин увеличения его содержания в грунтовых водах (до 6,2 мг/л). Повышенным содержанием Si (8,6 мг/л) отличаются богатые органическим веществом воды краевой зоны болот с осоково-щучковыми лугами низкого уровня и развитием оглеения в почвах. Возможно, активная миграция и аккумуляция Si в водах этих супераквальных ландшафтов Н–Fe-класса огра-

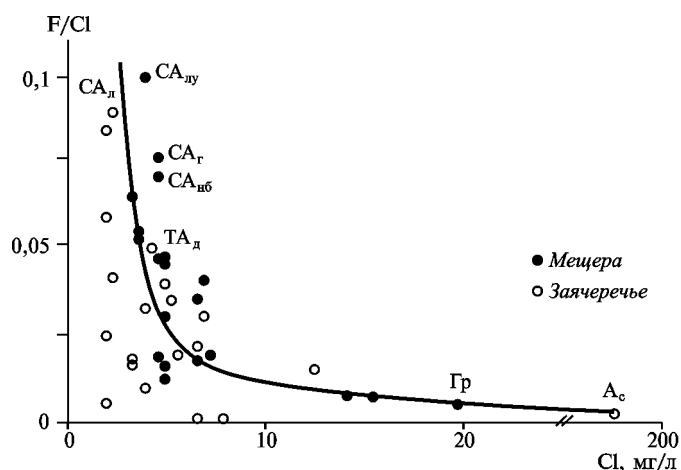


Рис. 2. Соотношение F и Cl в водах средне- и южнотаежных ландшафтов. Индексы элементарных ландшафтов соответствуют приведенным в табл. 1 и 2

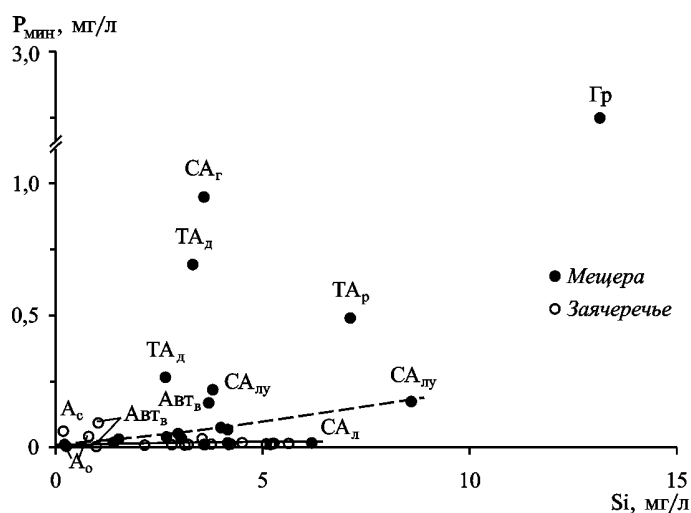


Рис. 3. Соотношение $P_{\text{мин}}$ и Si в водах средне- и южнотаежных ландшафтов. Индексы элементарных ландшафтов соответствуют приведенным в табл. 1 и 2

Таблица 2

Содержание растворенных форм Si и $P_{\text{мин}}$ в поверхностных и грунтовых водах (по данным 40 проб)

Ландшафтная приуроченность точек отбора вод	Индекс элементарных ландшафтов	Содержание слабоподвижных водных мигрантов, мг/л			
		Мещера		Заячережье	
		Si	$P_{\text{мин}}$	Si	$P_{\text{мин}}$
Автономные верховых и переходных сфагновых болот (Н- и Н-Fe)	Авт _в	3,6–3,7	0,01–0,2	1,0	0,004–0,09
Супераквальные хвойнолесные (Н-Fe)	CA _л	6,2	0,02	3,1	0,01
Супераквальные луговые и низинноболотные (Н-Fe)	CA _{лу} и CA _{нб}	1,5–8,6	0,03–0,2	—	—
Супераквальные гидромелиорированные болотно-луговые (Н-Fe)	CA _г	3,6–4,0	0,1–0,9	—	—
Трансаквальные рек и ручьев	TA _р	2,7–7,1	0,03–0,5	2,1–5,6	0,01–0,03
Трансаквальные дренажных канав	TA _д	2,6–3,3	0,3–0,7	—	—
Аквальные непроточных озер и стариц	A _о и A _с	0,2–4,1	0,004–0,02	0,2–0,8	0,04–0,06
Грунтовые воды родников и колодцев	Gr	13,1	2,7	3,7–5,3	0,01–0,02

ничивает его поступление в центральные части болотных массивов, где его содержание в мочажинах снижается до 1,5 мг/л. При зарастании лугов березняками и сокращении в видовом составе концентраторов Si барьерные функции приболотий ослабевают, и содержание этого элемента в грунтовых водах, мочажинах низинных болот и небольших озерах выравнивается (3,7—4,1 мг/л).

Накоплению Si в грунтовых водах (до 13,1 мг/л) способствует наличие водоупора; в поверхностных водах (до 7,1 мг/л) — приток дренажных вод, замедленный водообмен, подпор со стороны озер. В крупных, хорошо аэрируемых озерах (Белое, Филлеевское) содержание Si минимально (0,2—1,4 мг/л), что может быть связано с его осаждением в процессе биогенного опалогенеза, а в береговой зоне — с интенсивным поглощением зарослями камыша. Это свидетельствует о важной роли биогенеза в ограничении водной миграции Si.

По содержанию в водах $P_{\text{мин}}$ ландшафты Озерной Мещеры можно объединить в две группы, отражающие роль природных и антропогенных факторов в его водной миграции. В первую группу вошли естественные ландшафты с контрастным латеральным распределением $P_{\text{мин}}$. По уровню его содержания выделяются:

1) воды супераквальных луговых ландшафтов краевой зоны болот, отличающиеся высоким флористическим богатством и повышенным накоплением минеральных веществ в фитомассе. Содержание $P_{\text{мин}}$ в грунтовых водах (0,17—0,22 мг/л) формируется за счет притока из верхних звеньев катен и разложения органических остатков с высокой долей разнотравья и бобовых;

2) воды мочажин низинных болот с более низким содержанием $P_{\text{мин}}$ (0,03—0,07 мг/л), что обусловлено медленным разложением обедненных P злаков и мхов, его осаждением при образовании вивианита, а также иммобилизацией на сорбционном барьере по краю болота. Сюда также относятся воды рек и окружающих низинными болотами озер (0,02—0,04 мг/л);

3) воды ручьев, вытекающих из сфагновых болот, и крупных озер, в которых содержание $P_{\text{мин}}$ минимально (0,004—0,01 мг/л). Снижению его содержания в озерах способствует поглощение водными растениями и осаждение ниже зоны термоклина, затрудняющее подъем в верхние слои [3]. Обеднение P особенно характерно для акватории отличающегося большой глубиной оз. Белое.

Вторая группа включает гидромелиорированные ландшафты. В них зафиксировано высокое содержание $P_{\text{мин}}$ (0,1—0,7 мг/л) в грунтовых водах и дренажных канавах (рис. 3). При функционировании таких ландшафтов миграция P контролируется двумя противоположными процессами — выносом с дренажным стоком в результате увеличения содержания подвижных форм при активном разложении торфов и закреплении в почвах на кислородном барьере в виде железофосфатов. Возрастание степени гидроморфности при

деградации Вожской мелиоративной системы и возвращение глеевой обстановки способствуют разрушению кислородного барьера на осушенных землях и увеличению потерь P с дренажным стоком. Это сопровождается увеличением содержания $P_{\text{мин}}$ в р. Вожа (0,5 мг/л) и является важным условием эвтрофикации трансаквальных ландшафтов. Роль антропогенных факторов усиливается на селитебных территориях, где в водах колодцев зафиксировано максимально высокое содержание $P_{\text{мин}}$ (2,7 мг/л).

В распределении Si и $P_{\text{мин}}$ в водах Заячережья есть как сходные черты, так и различия (рис. 1, 3). Общее — увеличение значений их концентрации в реках и грунтовых водах агроландшафтов: для Si она достигает 3,2—5,6, а для $P_{\text{мин}}$ — 0,01—0,02 мг/л. В естественных условиях зоны обеднения и обогащения вод этими элементами имеют разную локализацию в катенах. Для Si характерно: 1) низкое содержание в мочажинах верховых болот и в питающихся их водами водораздельных озерах (0,8—1,0 мг/л); 2) значительная вариативность концентрации в водах ручьев залесенных моренно-озерно-ледниковых равнин (2,1—5,1 мг/л), что связано с особенностями катенарной структуры малых водосборов и содержанием в водах органического вещества; 3) снижение концентрации в водах старичных понижений (до 0,2 мг/л), окаймленных полосой из камыша, тростника и других злаков с кремниевым скелетом, выступающих в роли латерального фитобарьера, перехватывающего Si из водных потоков.

Содержание $P_{\text{мин}}$ в водах сфагновых болот среднетаежных ландшафтов ниже, чем в Мещере, однако оно сильно варьирует (0,004—0,09 мг/л) и выше на верховых болотах по сравнению с переходными, что требует дополнительной проверки. Основными ловушками на пути водной миграции $P_{\text{мин}}$ служат зарастающие непроточные озера и старицы, в водах которых содержание $P_{\text{мин}}$ достигает 0,04—0,06 мг/л ($L = 15$). Фосфор, в отличие от Si, не задерживается на фитобарьере в тростниковой полосе, а накапливается в конечных водоемах стока.

Выводы. 1. На водную миграцию аниогенных элементов в таежных ландшафтах влияют интенсивность водообмена, наличие гидроморфных комплексов, степень открытости каскадных систем, а также биогеохимическая специализация и активность фитоценозов. Значимость этих факторов корректируется индивидуальностью поведения конкретных элементов, что определяет контрастность распределения их растворенных форм в водах и локализацию в катенах.

2. Геохимические ловушки, в которых накапливаются подвижные формы аниогенных элементов, приурочены к гетерономным звеньям катен: в среднетаежных ландшафтах — к долинам рек (накопление в старицах Cl, F, $P_{\text{мин}}$); в полесских южнотаежных ландшафтах — к краевым зонам низинных болот ($P_{\text{мин}}$, F, Si) и бессточным озерам (Cl). Латеральная

дифференциация растворенных форм элементов в водах отражает внутреннюю неоднородность краевой зоны болот и зависит от содержания в водах органического вещества, интенсивности включения элементов в биологический круговорот, наличия биогеохимических и физико-химических барьеров.

3. Субаквальные ландшафты с застойным водным режимом функционируют как геосистемы с сильными положительными обратными связями. Их эвтрофикация ускоряется за счет эффектов взаимоусиления,

возникающих при одновременном накоплении растворенных форм различных биогенных элементов, что стимулирует развитие гидатофитов и гидрофитов с разной филогенетической специализацией. В Мещере этот процесс наиболее активно проявляется в реках с замедленным водообменном, служащих приемниками дренажных вод; в среднетаежных ландшафтах — в субаквальных комплексах неполных геохимических сопряжений, когда возможен дополнительный приток биогенов с грунтовыми водами из агроландшафтов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авессаломова И.А. Внутренняя ландшафтно-геохимическая структура болот и факторы ее формирования (на примере юга Архангельской области) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2003. № 1. С. 59—67.

2. Авессаломова И.А., Дьяконов К.Н. Геохимические аспекты осушительной мелиорации в долино-зандровых ландшафтах Мещеры (закономерности водной миграции химических элементов) // Там же. 1983. № 3. С. 46—54.

3. Башкин В.Н., Касимов Н.С. Биогеохимия. М.: Научный мир, 2004.

4. Глазовская М.А. Геохимия природных и техногенных ландшафтов СССР. М.: Высшая школа, 1988.

5. 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.

6. Добровольский В.В. Основы биогеохимии. М.: Высшая школа, 1998.

7. Дьяконов К.Н., Авессаломова И.А., Иванов А.Н. и др. Функционирование и динамика равнинных ландшафтов // География, общество, окружающая среда. Т. 2. Функциони-

рование и современное состояние ландшафтов. М.: Городец, 2004. С. 129—154.

8. Иванов В.В. Экологическая геохимия элементов. Кн. 2. М.: Недра, 1994.

9. Ковальский В.В. Геохимическая экология. М.: Наука, 1974.

10. Крайнов С.Р., Швеиц В.М. Основы геохимии подземных вод. М.: Недра, 1980.

11. Лурье Ю.Ю. Унифицированные методы анализа вод. М.: Химия, 1971.

12. Перельман А.И. Геохимия элементов в зоне гипергенеза. М.: Недра, 1972.

13. Перельман А.И., Касимов Н.С. Геохимия ландшафта. М.: Астрель, 1999.

14. Учватов В.П. Ландшафты Приокско-террасного биосферного заповедника // Ландшафтно-геохимические основы фонового мониторинга природной среды. М.: Наука, 1989. С. 103—117.

15. Хорошев А.В., Прозоров А.А. Динамика щелочно-кислотных условий в почвах среднетаежных ландшафтов // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2000. № 1. С. 50—55.

Поступила в редакцию
17.05.2011

I.A. Avessalomova, K.N. Diakonov, A.V. Savenko

GEOCHEMICAL TRAPS ON THE WAY OF WATER MIGRATION OF ANIONIC ELEMENTS (CASE STUDY OF TAIGA LANDSCAPES OF THE EAST-EUROPEAN PLAIN)

Distribution of anionic elements (Cl, F, Si, P) in the water of taiga landscapes of the East-European Plain was analyzed. Factors of lateral differentiation of their mobile forms and contrasts of their localization in catenas were revealed. The role of anthropogenic factors which change water migration of biogenic elements and the preconditions of eutrophication of water bodies are discussed.

Key words: water migration, anionic elements, catena, geochemical barriers, lateral differentiation.