

СОДЕРЖАНИЕ

Жизнь и научное творчество А.И. Перельмана	3
<i>Формы миграции вещества в ландшафтах</i>	
Жидкин А.П., Геннадиев А.Н., Кошовский Т.С., Чендев Ю.Г. Пространственно-временные параметры латеральной миграции твердофазно- го вещества почв (Белгородская область)	9
Самонова О.А., Касимов Н.С., Асеева Е.Н. Металлы в гранулометри- ческих фракциях почв овражной системы (юго-восточная часть Смоленско-Мос- ковской возвышенности)	18
Семенов И.Н., Касимов Н.С., Терская Е.В. Латеральное распределе- ние форм металлов в тундровых, таежных и лесостепных катенах Восточно-Ев- ропейской равнины	29
<i>Геохимия техногенных ландшафтов</i>	
Никифорова Е.М., Кошелева Н.Е., Хайбрахманов Т.С. Экологи- ческие последствия применения противогололедных реагентов для почв Вос- точного округа Москвы	40
Власов Д.В., Касимов Н.С. Геохимические аномалии металлов и металло- идов в компонентах ландшафтов в восточной части Москвы: парагенезисы эле- ментов и типология	50
Авессаломова И.А. Биогеохимическая неоднородность агроландшафтов (на примере среднетаежной подзоны юга Архангельской области)	58
Касимов Н.С., Лычагин М.Ю., Чалов С.Р., Шинкарева Г.Л., Пашкина М.П., Романченко А.О., Промахова Е.В. Бассейновый анализ потоков веществ в системе Селенга–Байкал	67
<i>Геохимия природных ландшафтов</i>	
Богданова М.Д., Герасимова М.И., Горбунова И.А., Рябова Н.В., Лычагин М.Ю. Ландшафтно-геохимическое исследование бассейна р. Се- ленга	82
Геннадиев А.Н., Пиковский Ю.И., Смирнова М.А., Жидкин А.П., Ковач Р.Г. Углеродное состояние почв фоновых таежных ландшафтов (юго-западная часть Устьянского плато)	90
Асадулин Эн.Э., Мирошников А.Ю. Распределение разнородных тер- ригенных донных осадков в западной части Карского моря по геохимическим признакам	98
<i>Юбилей</i>	106

C O N T E N T S

A.I. Perel'man: life and science	3
<i>Migration patterns of matter in landscapes</i>	
Zhidkin A.P., Gennadiev A.N., Koshovskii T.S., Chendev Yu.G. Spatio-temporal parameters of the lateral migration of solid-phase soil matter (Belgorod Region)	9
Samonova O.A., Kasimov N.S., Aseeva E.N. Grain size distribution of metals in soils of a gully system (southeastern Smolensk-Moscow Upland)	18
Semenkov I.N., Kasimov N.S., Terskaya E.V. Lateral distribution of metal forms in tundra, taiga and forest steppe catenae of the East European Plain	29
<i>Geochemistry of technogenic landscapes</i>	
Nikiforova E.M., Kosheleva N.E., Khaibrakhmanov T.S. Ecological impact of antiglaze treatment on soils of the Eastern District of Moscow	40
Vlasov D.V., Kasimov N.S. Geochemical anomalies of metals and metalloids in landscape components of the eastern part of Moscow: parageneses of chemical elements and typology	50
Avessalomova I.A. Biogeochemical heterogeneity of agrolandscapes (middle taiga subzone of the southern Arkhangel'sk Region as an example)	58
Kasimov N.S., Lychagin M.Yu., Chalov S.R., Shinkareva G.L., Pashkina M.P., Romanchenko A.O., Promakhova E.V. Catchment based analysis of matter flows in the Selenga-Baikal system	67
<i>Geochemistry of natural landscapes</i>	
Bogdanova M.D., Gerasimova M.I., Gorbunova I.A., Ryabova N.V., Lychagin M.Yu. Landscape-geochemical studies in the Selenga River basin ...	82
Gennadiev A.N., Pikovskii Yu.I., Smirnova M.A., Zhidkin A.P., Kovach R.G. Hydrocarbon status of natural soils in taiga landscapes (southwestern part of the Ustyanskoe Plateau)	90
Asadulin En.E., Miroshnikov A.Yu. Geochemical variability of terrigenous bottom sediments in the western Kara Sea	98
<i>Jubilee.</i>	106

Этот специальный выпуск журнала посвящен 100-летию Александра Ильича Перельмана, который вместе со своим учителем Б.Б. Плыновым, а также с М.А. Глазовской создавал в середине прошлого века новую науку – геохимию ландшафтов. Его многогранное творчество включало в себя ряд научных направлений в науках о Земле.

Читателю предлагаются статьи, посвященные развитию идей А.И. Перельмана о формах миграции химических элементов в ландшафтах и их поведении в природных и техногенных ландшафтах.

ЖИЗНЬ И НАУЧНОЕ ТВОРЧЕСТВО А.И. ПЕРЕЛЬМАНА

Александр Ильич Перельман – выдающийся ученый-геохимик, географ, один из основателей новой науки – геохимии ландшафта, создатель учения о геохимических барьерах, крупнейший специалист в области биогеохимии, геохимии урана, геохимии эпигенетических процессов и экогеохимии, родился 18 мая 1916 г. в Москве в семье инженера. В 1933 г., после окончания школы рабочей молодежи и рабфака, он поступил на почвенно-географический факультет МГУ, где в то время преподавали многие выдающиеся ученые.

В подготовке студентов большое место занимали естественно-научные предметы: почвоведение, микробиология, биология, геология, физика, химия, которой Александр Ильич особенно увлекся. Труды В.И. Вернадского и А.Е. Ферсмана, Б.Б. Плынова и А.А. Саукова определили его интерес к геохимии – науке, которой Александр Ильич посвятил свою жизнь.

По окончании университета (1938) А.И. Перельман был оставлен в аспирантуре у профессора В.В. Геммерлинга и в июне 1941 г. защитил кандидатскую диссертацию на тему «Опыт энергетической характеристики некоторых реакций химического выветривания».

Великая Отечественная война прервала на время его занятия наукой – Александр Ильич был направлен в трест «Спецгео», занимавшийся военно-геологическим обеспечением Красной Армии. В Комиссии помощи фронту Всесоюзного географического общества работал его учитель Б.Б. Плынов, который в 1944 г. опубликовал брошюру «Роль географии почв и учения о ландшафтах в тактике и

оперативном искусстве» с практическими рекомендациями по оценке тактических свойств местности и составлению соответствующих карт.

Работая под руководством Б.Б. Плынова, Александр Ильич разрабатывал методику создания целевых разномасштабных ландшафтных карт, по заданию штабов инженерных войск разных фронтов составлял карты условий проходимости для пехоты и разных видов техники, приспособленности территории для огневых позиций при наступательных операциях, карты рационального размещения оборонительных сооружений и водоснабжения войск на оборонных рубежах, давал оценку маскировочных свойств местности, просматриваемости ее с земли и воздуха.

Составляя объяснительные записки к картам, он приобрел опыт лаконичного, предельно четкого описания явлений, происходящих в ландшафте, которые необходимо учитывать при разработке плана боевых операций. Этот простой и ясный стиль объяснения сложных геохимических проблем Александр Ильич перенес в дальнейшем в свои научные и учебные труды.

Творчество Александра Ильича очень многогранно. Он внес основополагающий вклад в геохимию ландшафта и геохимию эпигенетических процессов в зоне гипергенеза, геохимию почв и биосферы, гидрогеохимию, поисковую и экологическую геохимию, радиогеоэкологию, историю и популяризацию науки, геохимическое образование.

Главные черты научного творчества

После окончания Великой Отечественной войны для обеспечения страны новым видом мине-

рального сырья быстро развивающейся атомной промышленности Александр Ильич начал изучать образование месторождений и рудопроявлений урана, геохимию этого элемента в зоне гипергенеза, что позволило сделать вывод о геохимическом единстве ландшафтной и гипергенной миграции химических элементов. Он считал, что многие процессы, протекающие в почвах, можно рассматривать как своеобразные модели значительно более грандиозного перемещения и концентрации вещества в коре выветривания и подзоне катагенеза, поэтому геологам полезно изучать почвенные процессы как модель рудообразования. Легкая доступность почв для исследования, современный характер протекающих в них процессов делает их ценными объектами для изучения различных геологических явлений. На эту сторону почвообразования ученые еще не обращали внимания, здесь открывались новые возможности для теоретических построений.

Основными направлениями дальнейших научных исследований А.И. Перельмана стали геохимия ландшафта и геохимия эпигенетических процессов в зоне гипергенеза.

Основы геохимии ландшафта как новой пограничной науки между географией, геологией и почвоведением заложены в конце 1940-х гг. замечательным ученым академиком Б.Б. Полиновым. А.И. Перельману принадлежит заслуга первого систематического изложения ее основ – в 1955 г. появляются «Очерки геохимии ландшафта», в которых намечен каркас создаваемой науки. Особенно ярко талант Александра Ильича как одного из создателей геохимии ландшафтов отразился в его ставших классическими книгах «Геохимия ландшафта», издававшихся в 1961, 1966, 1975, 1999 г. Каждое последующее издание было, по существу, отдельным трудом, значительно переработанным и дополненным новыми разделами. Эти книги одновременно служили учебными пособиями по университетскому курсу «Геохимия ландшафта» на географическом факультете МГУ, который он с 1951 г. блестяще читал более 40 лет.

По А.И. Перельману, геохимия ландшафта состоит из нескольких основных направлений.

Общая геохимия ландшафта – теоретические основы науки

Разрабатывая геохимию ландшафта, Александр Ильич опирался на труды своего учителя Б.Б. Полинова о системообразующей роли миграции вещества и геохимической сопряженности ландшафтов. В работах А.И. Перельмана получили развитие основополагающие представления о классификации элементарных и геохимических ландшафтов, геохими-

ческих сопряжениях, о видах миграции веществ в ландшафтах, о ведущей роли биологического круговорота в миграции веществ, биофильности элементов. Они развивали учение В.И. Вернадского о биосфере. А.И. Перельманом предложен один из главных биогеохимических показателей – коэффициент биологического поглощения – соотношение между химическим составом организмов и питающей средой, на его основе разработаны известные ряды биологического поглощения Перельмана.

Особенно значителен вклад Александра Ильича в разработку учения о водной миграции элементов в ландшафтах и биосфере. Изучая геохимические условия миграции и концентрации веществ, основываясь на предложенном им правиле типоморфности и принципе подвижных компонентов, Александр Ильич ввел фундаментальное понятие о классах водной миграции, представляющих собой мозаику сочетаний окислительно-восстановительных, кислотно-щелочных, сорбционных и других условий в морских, поверхностных и подземных водах, почвах, корях выветривания, изверженных и осадочных породах.

Понятие о классах водной миграции позволило систематизировать геохимические обстановки практически во всех компонентах гидросферы, литосферы и биосферы, развить концепцию геохимического поля.

Особенно полезным для понимания роли и значения окислительно-восстановительных условий в миграции химических элементов оказалось разделение восстановительной обстановки на глеевую и сероводородную, что объясняло многие особенности миграции и концентрации элементов с переменной валентностью (U, Mo, Cu и др.) в гидроморфных условиях. Предложенный им коэффициент водной миграции, отражающий связь химических составов вод, почв и горных пород, остается одним из важнейших геохимических показателей, с помощью которого сравнивают миграцию распространенных и редких элементов, оценивают интенсивность миграции в земной коре большинства элементов Периодической системы.

Ландшафтно-геохимические системы

Вслед за Б.Б. Полиновым А.И. Перельман вместе с М.А. Глазовской внес основополагающий вклад в представления об элементарных и геохимических ландшафтах. Он сформировал понятие о геохимических сопряжениях – последовательностях почв и ландшафтов на элементах рельефа, которое сыграло важную роль в становлении и развитии миграционной катенарной парадигмы в геохимии ландшафтов. Совместно с Н.С. Касимовым им предложена одна из первых географо-геохимических систематик катен.

Учение о геохимических барьерах

Последовательно развивая концепцию геохимического поля, Александр Ильич обратил внимание на то, что химические элементы обычно концентрируются на границах контрастных геохимических полей в различных компонентах и подсистемах ландшафтов и биосферы в целом. Учение о геохимических барьерах – одно из важнейших его достижений, вошедшее в золотой фонд науки, оно успешно используется не только в геохимии ландшафта, но и в геохимии, гидрогеохимии, литологии, гидрогеологии, почвоведении и других науках. Установлена большая роль геохимических барьеров в формировании месторождений U, Cu, Mo и других полезных ископаемых.

Дальнейшим развитием учения о геохимических барьерах должен стать переход от накопления эмпирических данных о барьерах к экспериментальному и математическому моделированию процессов, протекающих на границах разнородных геохимических полей, что позволит научно обосновать создание искусственных геохимических барьеров, препятствующих загрязнению среды. В прикладном аспекте учение о геохимических барьерах и книга «Геохимические барьеры в зоне гипергенеза» (1999) служат сейчас одной из теоретических основ геохимических поисков рудных месторождений и экогеохимии ландшафтов. Например, показано, что формирующаяся в городских почвах система геохимических барьеров ведет к усилению контрастности техногенных аномалий.

Региональная геохимия и систематика ландшафтов, ландшафтно-геохимическое картографирование, включающие геохимическую классификацию ландшафтов и геохимическую характеристику ландшафтов основных природных зон и областей, – другое важное направление исследований А.И. Перельмана. Предложенная им геохимическая классификация ландшафтов стала – наряду с классификацией М.А. Глазовской – инструментом регионального ландшафтно-геохимического анализа и до настоящего времени широко используется в поисковой и экологической геохимии. Сам Александр Ильич, будучи неутомимым полевым исследователем, внес огромный вклад в познание геохимии ландшафтов Казахстана и Средней Азии, Забайкалья, Якутии, Бурятии, Сибири, Европейской России и других районов страны. Созданная им «Ландшафтно-геохимическая карта СССР» до сих пор не имеет аналогов.

Геохимия эпигенетических процессов. Историческая геохимия и палеогеохимия ландшафтов

Геохимическая история всегда была одним из основных предметов исследований Александра

Ильича. Начав с изучения геохимии солей и урана в неогеновых почвах Средней Азии, что было темой его докторской диссертации (1953), он создал стройную эпигенетическую концепцию, в рамках которой развил представления о гипергенной геохимической эволюции горных пород и водоносных горизонтов под влиянием изменяющихся факторов миграции веществ (климата, тектоники, водоносности и др.). В книге «Геохимия эпигенетических процессов» (1961, 1963, 1968) он обосновал основные геохимические типы и классы эпигенетических процессов, она переведена на английский язык и наряду с «Геохимией ландшафта» является одной из фундаментальных работ гипергенной геохимии. Концепция эпигенетических геохимических процессов имела важное прикладное значение для объяснения образования эпигенетических урановых месторождений.

Александр Ильич всегда использовал конкретные научные идеи для установления самых общих закономерностей геохимической эволюции, выделив основные этапы и стадии развития биосферы и ландшафтов в истории Земли. Им развиты представления о палеогеохимии ландшафтов в разные периоды геологической истории, выделены основные типы геохимической эволюции ландшафтов рудных провинций России и сопредельных государств, разработаны методы создания палеогеохимических ландшафтных карт. Во всех своих работах он последовательно применял принцип историзма.

Геохимия элементов в зоне гипергенеза

Важное место в трудах Александра Ильича принадлежит геохимии отдельных химических элементов в ландшафтах и зоне гипергенеза в целом. Он предложил оригинальную геохимическую классификацию элементов по характеристикам их поведения в ландшафтах, основанную на особенностях миграции и концентрации элементов в различных геохимических обстановках. У него были «любимые» элементы, прежде всего уран, которым он занимался всю научную жизнь, став одним из ведущих в стране специалистов по гипергенной геохимии урана. Он детально изучил и объяснил поведение этого элемента в земной коре и зоне гипергенеза, особенности его миграции и концентрации в зависимости от характера эпигенетических процессов, присутствия геохимических барьеров, а в верхних этажах зоны гипергенеза – от геохимических особенностей ландшафта. По результатам этих исследований в 1962 г. опубликована «Геохимия урана в зоне гипергенеза» – первая монография на эту тему, написанная А.И. Перельманом вместе с Л.С. Евсеевой и переизданная в 1974 г. в расширенном и переработанном

виде в соавторстве с Л.С. Евсеевой и К.Е. Ивановым. Много внимания уделял А.И. Перельман вопросам экзогенного рудообразования урана на геохимических барьерах. Под его редакцией и при участии группой ведущих специалистов геологов, гидрогеологов и геохимиков в 1965 г. опубликована монография «Экзогенные эпигенетические месторождения урана», а в 1980 г. – монография «Гидрогенные месторождения урана».

Много внимания он уделял изучению Mo, Cu, Cr, Br, Se, Sr, Fe, Mn, оценивая не только их поведение в ландшафтах, но и значение при поисках полезных ископаемых, для сельского хозяйства, медицины и др. В 1972 г. вышла в свет монография «Геохимия элементов в зоне гипергенеза» (1972), в которой рассмотрено поведение в ландшафтах и корях выветривания первых 28 химических элементов Периодической системы, эта книга широко используется специалистами и в настоящее время.

Поисковая геохимия

Все научное творчество Александра Ильича было тесно связано с практикой. Еще в начале 1950-х гг. он стал внедрять теорию и методы геохимии ландшафта и геохимии эпигенетических процессов в поисковую геохимию. В 1956 г. на основе карты геохимических ландшафтов им вместе с Ю.В. Шарковым составлена «Карта районирования территории СССР по условиям ведения геохимических поисков рудных месторождений», которая нашла широкое применение в практике поисковых работ. Особенно важное значение при поисках приобрели его учение о геохимических барьерах, на основе которого проводится оценка геохимических аномалий, а также методика ландшафтно-геохимического картографирования, используемая для дифференциации методов поисков в зависимости от ландшафтной обстановки. Со временем Александр Ильич стал одним из самых цитируемых авторов в области поисковой геохимии, а геохимия ландшафта – одной из теоретических основ геохимических поисков рудных месторождений. Работы по поисковой геохимии проводились в ИГЕМ РАН и на географическом факультете МГУ имени М.В. Ломоносова, где в 1966 г. А.И. Перельманом была создана Мугоджарская экспедиция, в которой за 30 лет поработали десятки студентов и аспирантов. Итогом ландшафтно-геохимических исследований в Казахстане, проводимых в течение 20 лет под руководством Александра Ильича, стала известная всем специалистам в области поисковой геохимии монография «Геохимия ландшафтов рудных провинций» (1983).

Экогеохимия ландшафтов

Начиная с 1960-х гг. Александр Ильич обращается к проблемам геохимического качества и

загрязнения природной среды. Он выделил еще одно научное направление – геохимию культурного ландшафта, в котором особое внимание уделяется геохимическим аспектам санитарно-гигиенической и эколого-геохимической оценки ландшафта. В дальнейшем Александр Ильич – вслед за В.И. Вернадским и А.Е. Ферсманом – выделял как особый вид техногенную миграцию, предложил такие новые понятия, как технофильность элементов, полезные и вредные техногенные геохимические аномалии, техногенные (искусственные) геохимические барьеры, техногенные почвы, илы, коры выветривания, водоносные горизонты. Особенно полно проблемы геохимии техногенных ландшафтов изложены в его последних работах, посвященных геохимической систематике городов и городских ландшафтов, применению методов геохимии ландшафта при оценках экологического состояния территорий. Эта проблематика нашла отражение в последнем издании «Геохимии ландшафта» (совместно с Н.С. Касимовым), вышедшем в 1999 г. Наряду с работами М.А. Глазовской они послужили теоретической основой особого раздела геохимии ландшафта – геохимии техногенных ландшафтов или экогеохимии ландшафтов, которые стали одним из основных направлений исследований кафедры геохимии ландшафтов и географии почв географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова и лаборатории радиогеоэкологии ИГЕМ РАН.

Радиогеоэкология

После чернобыльской аварии остро стал вопрос о защите окружающей среды от радиационного загрязнения, и Александр Ильич активно включился в изучение искусственных радионуклидов в ландшафтах – проводились полевые исследования поведения радионуклидов в чернобыльской зоне и вокруг предприятий атомной промышленности, природных геохимических барьеров и возможности создания искусственных барьеров. В ИГЕМ РАН была составлена «Карта ландшафтно-геохимических условий миграции радионуклидов и размещения источников радиоактивного загрязнения России».

В настоящее время эти работы продолжают на Кольском полуострове, севере Западной Сибири, Новой Земле и в Карском море на основе представлений о локальных и региональных каскадных (бассейновых) ландшафтно-геохимических системах.

Развитие геохимического образования, популяризация науки, научные биографии

Научное творчество Александра Ильича отличало стремление в ясной и доступной форме изложить основные идеи науки для студентов и не-

специалистов в области геохимии. Именно поэтому, читая более 40 лет курс геохимии ландшафта в МГУ и будучи университетским профессором, он изложил свои основные идеи о геохимии и геохимии ландшафта в виде учебников и учебных пособий, прежде всего в «Геохимии ландшафта», которая вышла (считая монографию 1955 г.) 5-ю изданиями и стала классическим университетским учебником. В этих книгах в расширенном виде приведены все основные фундаментальные положения геохимии ландшафта.

Для геологических специальностей А.И. Перельман издал учебник «Геохимия» (1979, 1989), который написан в духе идей В.И. Вернадского, в этой книге основное внимание уделено видам миграции элементов, в том числе биогенной миграции и биокосным системам, что, как правило, не свойственно другим учебникам по геохимии.

Александр Ильич был замечательным популяризатором геохимии. Ему принадлежат увлекательные книги «Атомы в природе», «Геохимия биосферы», «Геохимия природных вод», «Биокосные системы Земли», раскрывающие процессы миграции и концентрации химических элементов в биосфере и ландшафтах, значение жизни для геохимических процессов на Земле, разъясняющие и развивающие идеи Вернадского.

И, наконец, Александр Ильич всегда отдавал должное своим учителям и предшественникам, создав научные биографии выдающихся геохимиков – В.И. Вернадского, А.Е. Ферсмана, А.А. Саукова, Б.Б. Полынова (последняя написана совместно с М.А. Глазовской и Е.И. Парфеновой), в которых ярко проявился его талант как историка науки.

Учитель и человек

Александр Ильич был неутомимым полевым исследователем. Его экспедиционные работы охватывали почти все ландшафтные зоны страны. Работая в тесном контакте с научными и производственными организациями почти всех республик бывшего СССР, А.И. Перельман развивал и совершенствовал теорию геохимии ландшафта. Одновременно идеи и методы геохимии ландшафта он внедрял в практику геохимических поисков месторождений полезных ископаемых и охраны окружающей среды от техногенного загрязнения. Александр Ильич читал множество лекций, проводил семинары, давал многочасовые консультации, заключал договоры о научном сотрудничестве. Под его руководством и при его участии разработано 10 способов внедрения методов геохимии ландшафта в практику народного хозяйства, на 6 из них получены авторские свидетельства. Ода-

ренность и научная интуиция сочетались в нем с большой работоспособностью и наблюдательностью. Он придавал большое значение накоплению фактического материала, умело обобщал факты, его работы всегда насыщены конкретными примерами.

Владея даром ясного изложения научных идей, Александр Ильич умел увлечь ими слушателей, сделать единомышленниками людей разных профессий. Школа геохимии ландшафта А.И. Перельмана объединяла геологов, гидрогеологов, геохимиков, географов, почвоведов, геоботаников, биогеохимиков, экологов. Им подготовлены десятки кандидатов наук и несколько докторов наук. Его отличала не только широта научных интересов и идей, он всегда знал и увлекательно рассказывал об истории и культуре народов тех районов, где проходили экспедиционные маршруты. А глубокое знание художественной литературы и особенно отечественной поэзии делало его всегда желанным и увлекательным собеседником.

Плодотворная научная деятельность А.И. Перельмана отмечена Государственной премией СССР в области науки и техники, Премией Правительства Российской Федерации, золотыми медалями Ф.П. Литке, Русского географического общества и ВДНХ. За участие в Великой Отечественной войне А.И. Перельман награжден орденом Отечественной войны 2-й степени, медалями «За доблестный труд в Великой Отечественной войне», «За трудовую доблесть» и юбилейными медалями.

А.И. Перельман вел большую общественную работу. Он был членом ученых советов ИГЕМ, ИМГРЭ, ВСЕГИНГЕО, Бюро секции РАЕН, председателем Комиссии геохимии ландшафта при Межведомственном совете по проблеме «Научные основы геохимических методов поисков месторождений полезных ископаемых», членом Научного совета при Академии наук СССР по проблеме «Научные основы преобразования природных ландшафтов», членом редакционных советов в издательствах «Недра» и «Высшая школа», почетным членом Русского географического общества, заслуженным Соросовским профессором.

А.И. Перельман – выдающийся отечественный геохимик

Оглядываясь сейчас на творчество А.И. Перельмана, которое в основном пришлось на вторую половину XX в., хорошо видно то выдающееся место, которое оно занимает в науках о Земле. Александр Ильич выполнил много конкретных геохимических исследований, ввел новые геохимические понятия и показатели, был одним из основателей

новой науки – геохимии ландшафта, академической и университетской Ландшафтно-геохимической научной школы, которая активно развивается. Но главное, что отличает творчество Александра Ильича, – его творческий дух, который во многом способствовал вовлечению и развитию идей В.И. Вернадского в науки о Земле, в ряд научных

направлений: гидрогеохимию, геохимию почв, кор выветривания и континентальных отложений, литологию, биогеохимию, общее почвоведение и географию почв, учение о полезных ископаемых. Есть все основания считать, что его имя стоит в одном ряду с выдающимися геохимиками нашего времени.

*Н.С. Касимов, Е.Н. Борисенко,
В.И. Величкин*

ФОРМЫ МИГРАЦИИ ВЕЩЕСТВА В ЛАНДШАФТАХ

УДК 631.459: 911.2: 550.4

А.П. Жидкин¹, А.Н. Геннадиев², Т.С. Кошовский³, Ю.Г. Чендев⁴

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ ПАРАМЕТРЫ ЛАТЕРАЛЬНОЙ МИГРАЦИИ ТВЕРДОФАЗНОГО ВЕЩЕСТВА ПОЧВ (БЕЛГОРОДСКАЯ ОБЛАСТЬ)

Получен комплекс данных, характеризующих пространственные и временные параметры латеральной миграции твердофазного вещества (ЛМТВ) почв в пределах широколиственно-лесного участка лесостепи на территории Белгородской области. Объектами исследования были естественные лесные и распахиваемые почвы склонов с разной длительностью сельскохозяйственного освоения. На относительно молодых пашнях (возраст освоения 100 лет) по сравнению со староосвоенными территориями (150 лет) установлено уменьшение среднегодового темпа миграции и аккумуляции твердофазного вещества почв, как для катен южных, так и для катен северных склонов. Оценены особенности перемещения почвенного вещества на естественных лесных участках, связанные с зоогенным фактором. Количественно охарактеризован зональный (сегментарный) тренд изменения склонового экспозиционного эффекта при проявлении ЛМТВ почв. На морфологически сходных распахиваемых склонах отмечено высокое подобие латерального расположения зон (сегментов) разной интенсивности миграции и аккумуляции вещества почв при одинаковой экспозиции склонов. Выделены сегменты почвенных катен, отличающиеся ускорением или замедлением темпа ЛМТВ почв при движении вниз по склону: стационарный, прогрессивно-миграционный, регрессивно-миграционный, стационарно-миграционный и аккумулятивный.

Ключевые слова: латеральная миграция, эрозия почв, твердофазное вещество, экспозиция склонов, почвенные катены.

Введение. Латеральная миграция вещества почв в ландшафтах – один из определяющих процессов пространственной дифференциации геосистем. Миграция происходит под действием различных факторов, в нее вовлекаются почвенные компоненты, находящиеся в разных фазовых состояниях. А.И. Перельман [1975] выделял несколько видов миграции вещества в ландшафтах, в том числе латеральную: механическую, физико-химическую, биогенную и техногенную. В случае первой из них – механической – перемещение вещества происходит по законам механики, основными агентами миграции служат силы тяжести, текучая вода, ветер, лед. В результате образуются делювий, пролювий, аллювий, морена и прочие кластические отложения. А.И. Перельман отмечал, что перемещение частиц во взвешенной форме дифференцированно влияет на вынос и аккумуляцию веществ различного химического состава, в результате чего «механическая миграция приводит к глубоким химическим изменениям в ландшафте» [Перельман, 1961, с. 124]. Среди других форм миграции механическая миграция по объему и скорости транспортировки материала часто играет ведущую роль [Горшков, 1980; Перельман, Касимов, 1999].

Однако специалисты в области геохимии ландшафтов, генезиса и географии почв уделяют ее изучению значительно меньше внимания, чем физико-химической или биогенной миграции. Между тем установление связей между почвами различных ландшафтно-геохимических позиций, оценка устойчивости пространственных почвенных комбинаций, прогноз состояния почвенного покрова в условиях воздействия на него разнообразных природных и техногенных факторов возможны только при учете результатов латеральной механической миграции, или латеральной миграции твердофазного вещества (ЛМТВ) почв. Термин «ЛМТВ почв» нам представляется более четким и конкретным в связи с тем, что механическая миграция может ассоциироваться с перемещением почвенного материала по склону механизмами, включая сельскохозяйственную технику. Кроме того, в геохимии ландшафтов и генетическом почвоведении нередко сопряженно исследуются латеральная и радиальная (например, лессиваж почв) миграция твердофазного вещества, и в этом аспекте термин «ЛМТВ почв» также более правилен.

В течение последних полутора десятилетий нами получен массив данных, характеризующих разные аспекты этих процессов [Геннадиев и др.,

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра геохимии ландшафтов и географии почв, науч. с., канд. геогр. н.; e-mail: gidkin@mail.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра геохимии ландшафтов и географии почв, профессор, докт. геогр. н.; e-mail: alexagenna@mail.ru

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра геохимии ландшафтов и географии почв, инженер; e-mail: tkzv@ya.ru

⁴ Белгородский государственный университет, факультет горного дела и природопользования, заведующий кафедрой, докт. геогр. н.; e-mail: sciences@mail.ru

2004, 2010, 2013; Голосов и др., 2011; Жидкин, 2010]. Подчеркнем, что в этих работах рассматривается ЛМТВ почв, которая происходит преимущественно под воздействием поверхностных временных водных потоков, но при этом включает и другие явления различной природы (например, перемещение вещества почв в результате работы сельскохозяйственной техники и почвенных землероев).

Можно отметить, что к настоящему моменту в географо-генетическом почвоведении и геохимии ландшафтов все еще сохраняется дефицит данных о рассматриваемых процессах миграции вещества, особенно актуальным остается выявление конкретных количественных параметров пространственно-временных проявлений ЛМТВ почв.

В связи с этим цель исследований состояла в количественной оценке особенностей миграции и аккумуляции твердофазного вещества почв на территории с выраженной пространственно-временной дифференциацией факторов этого процесса, а именно на склонах с разными возрастом освоения, типом землепользования и экспозицией. Для оценки объема и темпа ЛМТВ почв использован метод магнитного трассера.

Материалы и методы исследований. Территория исследований расположена в Шебекинском административном районе Белгородской области, в окрестностях пос. Батрацкие Дачи. Ключевой участок находится в пределах Среднерусской возвышенности и характеризуется структурно-денудационным типом рельефа с высокой степенью расчлененности овражно-балочной сетью. Почвообразующими породами служат лёссовидные карбонатные суглинки средне- и поднеплейстоценового возраста, как правило, средне- и крупнопылеватые. В некоторых местах на приводораздельных поверхностях они имеют небольшую мощность, почвенный профиль с глубины 50–80 см включает подстилающие породы – желто-бурые тяжелые, часто опесчаненные суглинки и глины палеогенового возраста, иногда с прослоями линз бурых песков и супесей мощностью 10–20 см.

Естественная растительность представлена кленово-дубовыми лесами с примесью ясеня и осины, с лещиной в подлеске и травостоем из неморальных видов (сныть, копытень, звездчатка). Сельскохозяйственные угодья преобладают по площади. Район характеризуется сложной многоэтапной историей сельскохозяйственного освоения земель с близким территориальным положением участков с разной длительностью распашки. Возраст распашки на исследованной территории датирован на основе анализа исторических карт (Генеральный план Белгородского уезда (1785), военно-топографическая карта Курской губернии (1864), карта растительности юго-востока Курской губернии из работы В.Н. Сукачева (1903)). По результатам анализа карт выбраны участки с пашнями разного возраста освоения – 150- и 100-летнего. Также изучены почвы неосвоенных земель под кленово-дубовым лесом, возраст которого, судя по анализу старинных карт, не менее 220 лет (рис. 1).

Объекты исследования на выбранных участках – катенарные сопряжения почв, протягивающиеся от ровных водораздельных позиций к днищам элементов овражно-балочной сети. Для корректного сравнения выбраны склоны, очень сходные по морфологическим параметрам и характерные для территории исследования – выпуклые в продольном сечении, прямые или слабовыпуклые в поперечном сечении, с крутизной, постепенно нарастающей от водоразделов к нижним частям склонов (максимально до 5–6°), длиной от 350 до 450 м. Морфологический анализ и подбор склонов проводили на основе цифровой модели рельефа исследуемой территории. На каждом катенарном сопряжении почв изучено по 7 разрезов, расположенных вдоль линий тока воды – на приводораздельной поверхности, слабонаклонной поверхности, в верхней, средней, самой крутой нижней частях склона, а также в днище балки или ложбины.

Поскольку экспозиция склонов также относится к ведущим факторам развития ЛМТВ почв, то исследования для разного режима землепользования проводили попарно с учетом полярной (северной и южной) экспозиции склонов. В общей сложности изучено 6 катенарных сопряжений почв (рис. 1).

Темп ЛМТВ почв оценивали с применением метода магнитного трассера. Этот метод основан на использовании сферических магнитных частиц (СМЧ) в качестве трассера передвижения твердофазного вещества почв. СМЧ образуются при высокотемпературных процессах, в частности при сжигании угля, и вместе с другими продуктами сгорания поступают в атмосферу. Основными источниками СМЧ на территории исследования служили паровые локомотивы, функционировавшие на железнодорожной линии Москва – Белгород – Харьков, которая была построена в 1868 г. Линия находится на расстоянии около 20 км от объектов исследования. Период нахождения СМЧ в исследуемых почвах и период оцениваемых процессов ЛМТВ почв составляет почти 150 лет. СМЧ могут сохраняться в почвах в течение длительного времени, как минимум несколько сотен лет [Геннадиев и др., 2004; Жидкин, 2010].

Современное распределение СМЧ в почвах катенарных сопряжений – результат их миграции вместе с твердофазным веществом почв. Сравнение запасов СМЧ в почвах склонов с их запасами в эталонной почве на плоских водораздельных участках, где перемещение твердофазного вещества практически отсутствует, позволяет оценить объем и темп миграции и аккумуляции твердофазного вещества почв. Исходные запасы СМЧ в эталонной почве на плоских водораздельных участках определяли с 10-кратной повторностью из образцов, отобранных случайно-систематическим методом (по спирали). Коэффициент вариации запасов трассера на пашнях составил лишь 21%, это низкое значение считается удовлетворительным при подобных исследованиях, проводимых с помощью других трассеров. Отбор и анализ проб почв на водораздельном участке и на

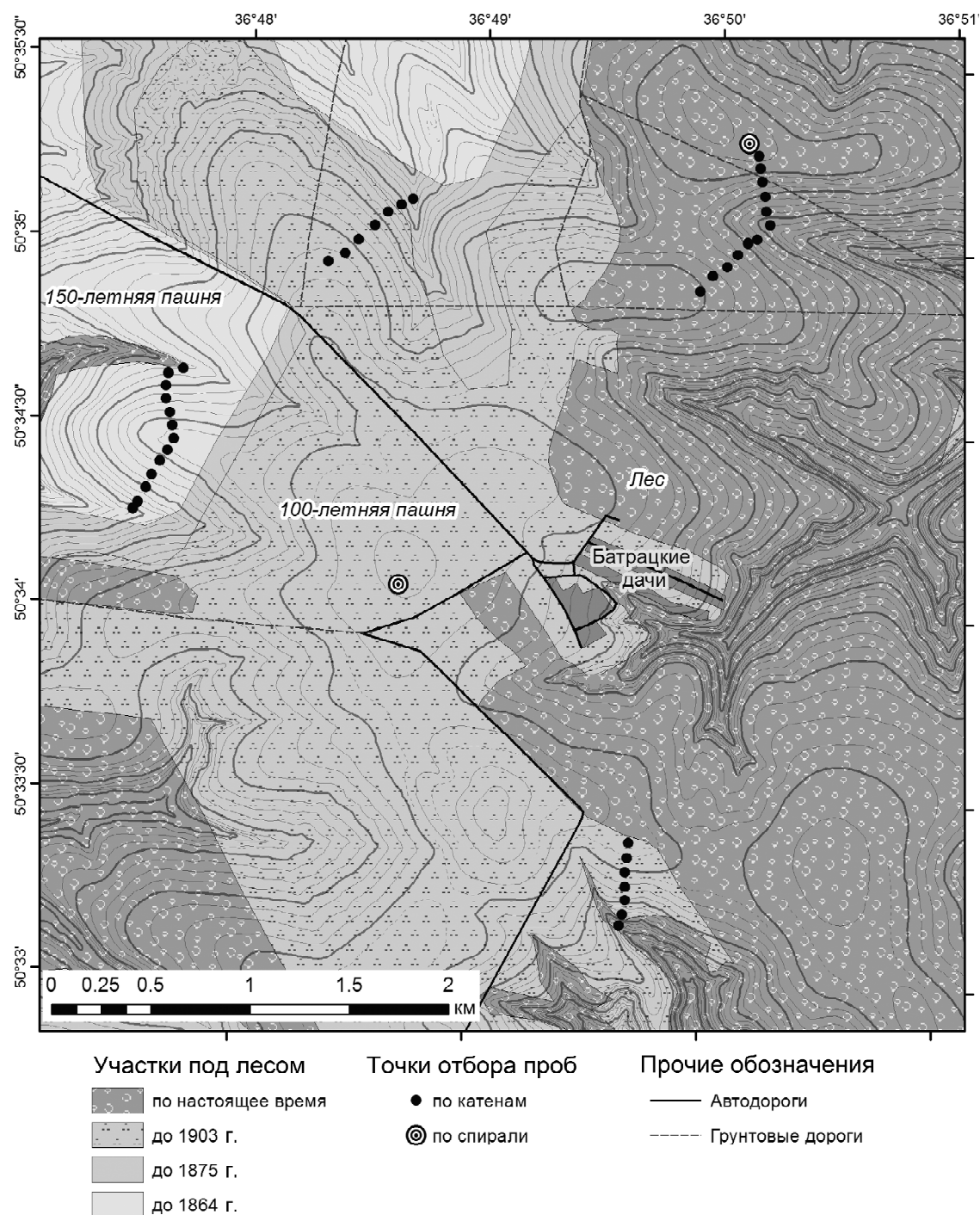


Рис. 1. Расположение исследованных катенарных сопряжений почв

Fig. 1. Location of the studied soil catenae

склонах проводили послойно с глубин 0–30 и 30–50 см. В слое 30–50 см запасы СМЧ составили в среднем лишь 8% от запасов в слое 0–30 см, проникновение СМЧ ниже 50 см в исследованных распаханых почвах оказалось незначительным. Поэтому расчет темпов ЛМТВ рассчитывали по суммарным запасам СМЧ в 50-сантиметровом слое. Основные методические подходы, применяемые к оценке ЛМТВ почв на основе метода магнитного трассера, описаны в работах [Геннадиев и др., 2004, 2013 и др.].

Расчет темпа миграции (–) и аккумуляции (+) твердофазного вещества распаханых почв на отдельных сегментах склонов (V_s , т/га в год) проводили согласно следующей формуле:

$$V_s = \frac{(X_n - X_{if}) M_p D_n \cdot 100}{X_{if} T}, \quad (1)$$

где X_{if} – запасы СМЧ во всем почвенном профиле на плоском водораздельном участке (г/м² в слое); X_n – запасы СМЧ во всем почвенном профиле оце-

ниваемого сегмента склона (г/м^2 в слое); $X_{\text{лр}}$ – запасы СМЧ в пахотном горизонте почвы на плоском водораздельном участке (г/м^2 в слое); M_p – мощность пахотного слоя (см); D_n – плотность пахотного слоя оцениваемого сегмента склона (г/см^3); T – период нахождения СМЧ в почвах исследуемой территории (год).

Темп миграции (–) и аккумуляции (+) твердофазного вещества распахиваемых почв для всего склона (V , т/га в год) рассчитывали с учетом площадей сегментов склона (S_n , м^2) по формуле

$$V = \sum \frac{V_s S_n}{\sum S_n}. \quad (2)$$

На естественных лесных склонах расчет темпа перемещения почвенного вещества проводили иным образом, чем на пашнях, в связи с другим вертикальным распределением СМЧ. В целинных почвах СМЧ имеют аккумулятивно-регрессивное профильное распределение, в отличие от распахиваемых почв, где содержание СМЧ в верхнем пахотном горизонте распределяется по вертикали достаточно равномерно. Такие различия в профильном распределении СМЧ в верхних горизонтах почв вызывают необходимость учитывать изменения запасов СМЧ в целинных почвах, что осуществлено нами следующим образом. В исследуемой эталонной почве образцы из верхних горизонтов почв отбирали послойно. Запас СМЧ составил 1,19 г/м^2 в верхних 7 см, в слое 7–14 см – 0,99; в слое 14–21 см – 0,51 г/м^2 . Убыль запасов СМЧ (разница между запасами СМЧ в профиле почвы на склоне относительно запасов СМЧ в эталонной почве) сравнивали с послойными запасами СМЧ в эталонной почве. Например, на 4-й точке на залесенном склоне северной экспозиции убыль запасов СМЧ составила 0,4 г/м^2 в 50-сантиметровом слое пропорционально запасам СМЧ в верхних 7 см эталонной почвы. Эти различия соответствуют убыли 2,3 см почвы (согласно расчету: $0,4 \cdot 7 / 1,19$). На 5-й точке убыль запасов СМЧ составила 1,7 г/м^2 в 50 см, что превышает запасы СМЧ в верхних 7 см эталонной почвы, это свидетельствует о том, что было перемещено более 7 см почвы. Такую убыль запасов СМЧ сравнивали с запасом СМЧ в верхних 14 см почвы, она соответствует убыли 10,9 см почвы (согласно расчету: $1,7 - 14 / (1,19 + 0,99)$). Методика подобных расчетов описана в работе [Жидкин, 2010].

Результаты исследований и их обсуждение.

Характеристика почвенного покрова. Почвенный покров территории заметно отличается на целинных и пахотных участках. Почвы под современной лесной растительностью относятся к подтипу темно-серых лесных со вторым гумусовым горизонтом. В профиле выделяются: лесная подстилка (2–3 см), а также горизонты серогумусовый (с поверхности до глубины 14–19 см); переходный гумусово-элювиальный (до глубины 26–35 см), переходный текстурно-элювиально-гумусовый с признаками второго гумусового (до 40–60 см), элювиально-текстурный с признаками второго гумусового (до 56–

78 см), текстурные горизонты (до 85–110 см), сменяющиеся аккумулятивно-карбонатным горизонтом материнской породы.

На пашнях 100-летнего возраста, в отличие от лесных почв, отсутствуют признаки второго гумусового горизонта. Почвы относятся к черноземам оподзоленным, близким к подтипу освоенных темно-серых лесных почв. Профиль этих почв включает следующие горизонты: пахотный (26 см); элювиально-гумусовый (до глубины 32 см); гумусово-элювиально-текстурный (до 54 см); элювиально-текстурный с заметной гумусовой прокраской (до 65 см); текстурный с признаками глееватости (до 113 см); аккумулятивно-карбонатный с мицеллярными и сегрегационными новообразованиями.

Для почвенного покрова участка с 150-летним сельскохозяйственным освоением характерны черноземы выщелоченные и оподзоленные освоенные. Профиль включает горизонты: пахотный (до глубины 28 см), гумусовый (до 36 см), переходный гумусовый с признаками побурения (до 45 см), переходный иллювиально-глинистый с признаками гумусонакопления (до 56 см), глинисто-иллювиальный (до 76 см), переходный к почвообразующей породе.

Влияние длительности распахивания на латеральную миграцию твердофазного вещества почв. На основе метода магнитного трассера рассчитаны и соотнесены между собой значения среднегодового темпа миграции и аккумуляции вещества почв на склонах разновозрастных пашен (таблица). Полученные значения среднегодового темпа ЛМТВ распахиваемых почв варьируют от 3,2 до 6,5 т/га в год на 100-летней пашне и от 6,6 до 8,6 т/га в год на 150-летней пашне на склонах разных экспозиций, что в целом соответствует средним значениям по Белгородской области, приведенным в литературе и в более ранних исследованиях авторов [Голосов и др., 2011; Жидкин, Чендев, 2014; Литвин, 2002; Чендев и др., 2008].

На молодой пашне отмечена менее интенсивная миграция вещества почв, чем на 150-летней пашне, особенно это проявляется на склонах одинаковой экспозиции: 6,5 т/га в год относительно 8,6 т/га в год на склонах южной экспозиции и 3,2 т/га в год относительно 6,6 т/га в год на склонах северной экспозиции.

Менее интенсивные проявления ЛМТВ почв на молодой пашне по сравнению со староосвоенной территорией отмечены и в максимальном темпе миграции вещества на отдельных частях исследованных склонов. Так, на склонах разной экспозиции на 100-летней пашне максимальный темп ЛМТВ почв достигал 10,9 и 14,1 т/га в год, а на 150-летней пашне – 14,0 и 18,6 т/га в год (рис. 2). Кроме того, разновозрастные пашни характеризуются разным темпом выноса твердофазного вещества почв за пределы катенарных сопряжений. На более молодой пашне этот показатель ниже и составляет 3,5–5,1 т/га в год, в то время как на староосвоенных территориях варьирует от 6,6 до 8,3 т/га в год (таблица).

Количественные характеристики латеральной миграции и аккумуляции твердофазного вещества почв на исследованных склонах участка Батрацкие Дачи

Экспозиция	Режим землепользования	Темп миграции вещества почв на склоне, т/га в год	Темп аккумуляции вещества почв на склоне, т/га в год	Вынос вещества почв за пределы склона, т/га в год	Потери вещества почв за весь период распахки, т/га
Южная	Лес	1,1	1,4	0,0	—
Северная	Лес	2,2	0	2,2	—
Южная	100-летняя пашня	6,5	1,4	5,1	~500
Северная		3,2	0,7	2,5	~250
Южная	150-летняя пашня	8,6	0,3	8,3	~1250
Северная		6,6	0	6,6	~1000

Меньшие значения среднегодового темпа ЛМТВ почв на молодой пашне по сравнению со староосвоенными землями на ключевом участке Батрацкие Дачи могут быть обусловлены общим уменьшением скорости миграции твердофазного вещества почв за последние полтора века.

Уменьшение темпа смыва вещества почв отмечено в работе авторов [Голосов и др., 2011], где был сопоставлен темп смыва вещества почв, полученный методом магнитного трассера (за последние 150 лет) и радиоцезиевым методом (за последние 25 лет). Для всех исследованных склонов южной экспозиции на ключевых участках в Тульской, Курской и Белгородской областях установлено, что средний темп смыва почвенного вещества за последние 20–25 лет заметно меньше, чем за 140–150-летний период распахки.

Сделанный ранее вывод об уменьшении среднемноголетнего темпа смыва почв детализируется и подтверждается при другом подходе, а именно при сравнении темпа ЛМТВ почв на разновозрастных пашнях, которое проводилось на основе использования одного метода магнитного трассера. Также нами показано, что снижение темпа ЛМТВ почв происходит как на склонах южной, так и северной экспозиции.

Установленное явление уменьшения скорости смыва вещества почв в среднем за 100-летний период распахки по сравнению с пашней 150-летнего возраста, вероятно, обусловлено потеплением климата и резким сокращением поверхностного стока в период весеннего снеготаяния. В последние несколько десятилетий отмечено повышение среднезимней температуры воздуха, приводящее к уменьшению глубины промерзания почв и как следствие к снижению коэффициента поверхностного стока [Кумани, 2004;

Петелько, Богачева, 2009]. Современное уменьшение поверхностного стока в период весеннего снеготаяния испытывают все исследованные разновозрастные пашни. Однако вклад последних десятилетий в среднюю скорость миграции вещества почв за последние 100 лет существенно выше, чем за последние 150 лет. Поэтому средний темп ЛМТВ почв за 100-летний период оказывается ниже, чем за 150-летний период.

В связи с разной интенсивностью ЛМТВ почв и длительностью распахки объем потерь твердофазного вещества почв на разновозрастных пашнях существенно отличается. На молодой пашне потери твердофазного вещества почв за весь период распахки составили от 250 до 500 т/га, а на староосвоенной пашне они оказались в несколько раз выше

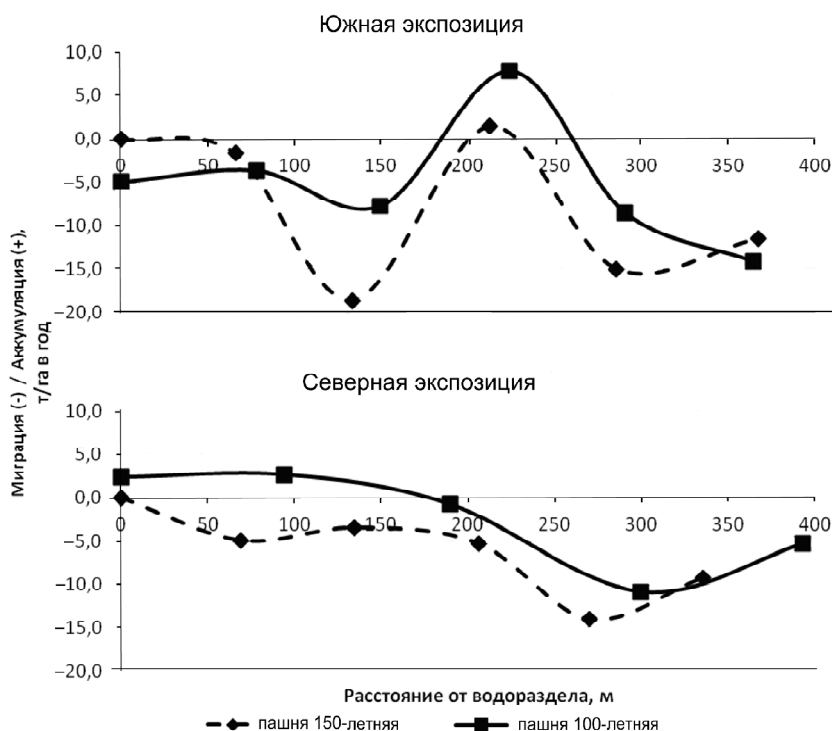


Рис. 2. Темп ЛМТВ почв на разновозрастных пашнях на склонах разной экспозиции

Fig. 2. Lateral migration rates of soil solid-phase matter on cropland slopes with different exposure

и характеризуются величинами в диапазоне 1000–1250 т/га за 150 лет распашки. Такого рода результаты, характеризующие историю освоения земель, необходимо учитывать при планировании противозерозионных мероприятий и землеустроительных работ.

На основе расчетов выявлены четкие различия во внутрисклоновой аккумуляции наносов между разновозрастными пашнями. На 100-летней пашне аккумуляция наносов отмечена на склонах обеих экспозиций и составляет 0,7 т/га в год на склоне северной экспозиции и 1,4 т/га в год на склоне южной экспозиции. В свою очередь на 150-летней пашне аккумуляция наносов практически отсутствует – <0,3 т/га в год. Разная скорость аккумуляции вещества почв, выявленная для разновозрастных пашен, видимо, обусловлена теми же причинами, что и изменение темпа миграции вещества, отмеченными ранее. В связи с потеплением климата происходит не только снижение общей скорости миграции вещества почв, но и уменьшение той составляющей транспортирующей силы водных потоков, которая приводит к увеличению объема внутрисклоновой аккумуляции наносов.

Для естественных лесных склонов, в отличие от распахиваемых земель, необходимо учитывать ряд дополнительных факторов, чтобы корректно оценить темп миграции и аккумуляции твердофазного вещества почв. В лесных целинных условиях следует иметь в виду не только явления смыва почв поверхностными водными потоками, но и существенные динамические воздействия на почвы со стороны растений и животных. При полевых обследованиях на лесных склонах обнаружены единичные вывалы деревьев (преимущественно в нижних частях склонов), а также участки с сильно нарушенными поверхностями в результате роющей и вскапывающей деятельности животных (в частности, кабанов).

В связи с высокой вариабельностью проявления процессов транслокации почвенного твердофазного вещества под лесом анализ запасов СМЧ выполнен по двум дублирующим катенам на каждом склоне. Установлено, что темп перемещения почвенного вещества на лесных склонах небольшой и в среднем по катенам составляет всего 1–2 т/га в год, т.е. в пределах погрешности метода исследования. Однако в отдельных случаях в средних и нижних частях лесных склонов, в местах с наиболее нарушенными поверхностями темп перемещения твердофазного вещества почв достигал 8–10 т/га в год, что, скорее всего, связано с активной роющей деятельностью животных (в первую очередь кабанов, которых привлекают места с обилием дубовых насаждений). В этих местах усилена зоогенная турбация почв, происходит нарушение сплошности растительного покрова и, как следствие, усилен смыв почв. Подчеркнем, что участки с повышенной степенью локальной турбированности почв не вносят существенный вклад в общую массу потерь вещества почв со всего лесного склона.

Выявленная разная скорость перемещения вещества почв под лесом, на молодой и староосвоенной пашнях объясняет некоторые морфологические свойства исследованных почв. Под лесом с низким темпом миграции твердофазного вещества изменение морфологических свойств почв в пределах склонов слабое. Наблюдается небольшое уменьшение мощности гумусовых горизонтов в почвах в верхних пологих частях склонов по сравнению с водораздельными позициями. У подножий склонов гумусовый горизонт имеет повышенную мощность на залесенных склонах обеих экспозиций. На 100-летней пашне с более высокой ЛМТВ почв, чем под лесом, морфологические почвенные свойства на склонах более контрастные по сравнению с лесным участком. Мощность гумусовых горизонтов максимальна на пологих склонах и снижается на водоразделе и крутом участке нижней трети склона. На склоне северной экспозиции также выше амплитуда колебаний мощности гумусового горизонта по сравнению с лесным участком. На пашне 150-летнего возраста с максимальным на исследованной территории темпом ЛМТВ почв мощность гумусового профиля черноземов выщелоченных и оподзоленных резко изменяется по склону – выявлены как максимальные среди всех изученных почв значения (в почвах подножий склонов северной экспозиции), так и минимальные (в нижней трети склона южной экспозиции).

Влияние экспозиции склонов на латеральную миграцию твердофазного вещества почв. В литературе имеются данные, свидетельствующие о более высокой скорости эрозии почв на склонах с «теплой» (южной) экспозицией относительно северных склонов [Лучицкая, Башкин, 1994; Голосов, 2006; Проценко, 2004 и др.]. Ранее нами [Геннадиев и др., 2010] установлено, что на морфологически сходных склонах с крутизной 5–6° различия в темпе смыва почв на склонах с противоположной экспозиций доходили до 6 раз на ключевом участке в Тульской области и до 2,5 раз на ключевом участке в Курской области.

Полученные нами результаты также свидетельствуют о повышенном темпе миграции твердофазного вещества почв на склонах южной экспозиции относительно северной, однако различия не столь велики и составляют 1,3–2 раза. Так, на 100-летней пашне на склоне южной экспозиции ЛМТВ почв составила 6,5 т/га в год, а на склоне северной экспозиции – 3,2 т/га в год. На 150-летней пашне на склоне южной экспозиции ЛМТВ почв составила 8,6 т/га в год, а на склоне северной экспозиции – 6,6 т/га в год (таблица).

Разную скорость смыва почв на склонах разной экспозиции в литературе связывают преимущественно с талым смывом. Предполагается, что при движении от более холодных к более теплым регионам экспозиционный эффект может ослабевать в связи с уменьшением вклада талого смыва в суммарный объем миграции твердофазного вещества почв. В результате обобщения полученных нами

данных в Тульской, Курской и Белгородской областях установлен определенный зональный тренд в изменении количественной характеристики экспозиционного эффекта при проявлениях ЛМТВ почв. Экспозиционный эффект направленно ослабевает на очень сходных по морфологии склонах: в Тульской области экспозиционные различия составляют 6 раз, в Курской области – 2,5 раза, а в Белгородской области лишь 1,3–2 раза на очень сходных по морфологии склонах.

Помимо параметризации темпов ЛМТВ почв проведен пространственный анализ локализации зон миграции и аккумуляции твердофазного вещества почв. Установлено подобие миграционно-аккумулятивных кривых для склонов с одинаковой экспозицией (рис. 2).

Для описания миграционной структуры исследованных катен мы вводим следующие термины, характеризующие сегменты катен с разной скоростью миграции и аккумуляции твердофазного вещества почв:

- *прогрессивно-миграционный сегмент* – участок склона, на котором преобладает вынос твердофазного вещества почв, и при движении вниз по склону темп миграции вещества почв возрастает;

- *регрессивно-миграционный сегмент* – участок склона, на котором преобладает вынос твердофазного вещества почв, и при движении вниз по склону темп миграции вещества почв уменьшается;

- *стационарно-миграционный сегмент* – участок склона, на котором по всей длине темп миграции вещества почв практически одинаков и составляет >3 т/га в год;

- *аккумулятивный сегмент* – участок склона, на котором преобладает аккумуляция твердофазного вещества почв;

- *стационарный сегмент* – участок склона, на котором отсутствует вынос или аккумуляция твердофазного вещества почв (в пределах 2–3 т/га в год), такой сегмент обычно приурочен к приводораздельным участкам.

Рассмотрим особенности пространственного проявления латеральной миграции и аккумуляции твердофазного вещества почв на освоенных склонах южной экспозиции (рис. 2). На 150-летней пашне в пределах верхних 70 м на приводораздельном участке склона выделяется стационарный сегмент, характеризующийся отсутствием миграции или аккумуляции вещества почв. Склон молодой пашни южной экспозиции начинается на плоской, очень слабонаклонной поверхности, занятой с одной стороны лесом, а с другой стороны – староосвоенной пашней. В связи с этим в пределах верхних 70–80 м на 100-летней пашне выделяется стационарно-миграционный сегмент с небольшим темпом выноса вещества почв (3,5–5 т/га в год).

Ниже по склонам южной экспозиции на расстоянии от 70–80 до 140–150 м выделен прогрессивно-миграционный сегмент катены, характеризующийся нарастанием миграции вещества до 7,7 т/га в год на 100-летней пашне и до 18,6 т/га в год на 150-лет-

ней пашне. Вниз по склону на 100-летней пашне на расстоянии от 150 до 180 м выделен регрессивно-миграционный сегмент склона, ниже сменяющийся аккумулятивным сегментом протяженностью около 80 м с темпом ЛМТВ, достигающим 7,9 т/га в год. На 150-летней пашне на расстоянии от 140 до 200 м выделен также регрессивно-миграционный сегмент склона, сменяющийся относительно коротким аккумулятивным сегментом протяженностью 20–30 м с небольшим (до 1,5 т/га в год) темпом аккумуляции. Ниже аккумулятивных сегментов на обоих склонах выделены прогрессивно-миграционные сегменты с нарастанием скорости миграции вещества почв до 14,1 т/га в год на 100-летней пашне и до 14,9 т/га в год на 150-летней пашне. На 150-летней пашне южной экспозиции в самой нижней части катены отмечено повторное уменьшение темпа ЛМТВ почв до 11,5 т/га в год.

На склонах северной экспозиции характер пространственной локализации зон миграции и аккумуляции твердофазного вещества почв существенно отличается от таковых на склонах южной экспозиции (рис. 2). На 100-летней пашне на протяжении 200 м от водораздела выделен стационарный сегмент, в пределах которого миграция или аккумуляция вещества почв практически отсутствует (<3 т/га в год). На склоне со 150-летней пашней на верхних 60 м склона выявлено нарастание скорости миграции вещества, которые к окончанию сегмента стабилизируются в интервале 3,5–5,5 т/га в год. На обеих пашнях на расстоянии около 200 м от водораздела стационарный и стационарно-миграционный сегменты сменяются прогрессивно-миграционным, протягивающимся на 260–300 м от водораздела. Максимальный темп смыва на этом сегменте на обеих пашнях достаточно близок – 13,8 т/га в год на 100-летней пашне и 16,8 т/га в год на 150-летней пашне. Ниже по склонам до их окончания прогрессивно-миграционные сегменты сменяются регрессивно-миграционными с темпом миграции в нижних частях катен 5,3 и 9,2 т/га в год.

В пределах изученных склонов отмечается волнообразный характер смены зон с разной скоростью миграции и аккумуляции вещества почв. При этом протяженность прогрессивно-миграционных сегментов исследованных катен варьирует от 60 до 100 м вне зависимости от экспозиции; регрессивно-миграционные сегменты имеют протяженность 30–60 м на склонах южной экспозиции и 90–100 м на склонах северной экспозиции; стационарные и миграционно-стационарные сегменты имеют протяженность 70–80 м на склонах южной экспозиции и 140–200 м на склонах северной экспозиции; аккумулятивные сегменты наблюдаются только на склонах южной экспозиции, их протяженность варьирует от 30 до 80 м. В целом исследованные склоны южной экспозиции характеризуются более частой сменой и меньшей протяженностью выделенных сегментов.

Таким образом, несмотря на разные длительность распахки и темп ЛМТВ почв, пространствен-

ная локализация зон миграции и аккумуляции вещества почв на разновозрастных пашнях оказалась достаточно сходной на склонах одной экспозиции. Различия проявились только в том, что миграционно-аккумулятивные кривые сдвинуты в сторону более высокой скорости ЛМТВ почв на пашне с более длительным периодом освоения.

Приведенные выше характеристики миграционной структуры изученных почвенных катен, возможно, в какой-то степени имеют случайный характер, что требует дальнейших исследований. Но в принципе не исключено, что полученные результаты пространственной смены ускорения и замедления темпа ЛМТВ почв в пределах разных сегментов склона могут дать новую информацию о явлениях латерального перемещения твердофазного вещества почв.

Выводы:

– показана существенная значимость ЛМТВ почв в формировании субстантивных потоков в пределах почвенно-геохимических катен исследованной территории. Получен комплекс данных, характеризующих как пространственные, так и временные параметры ЛМТВ почв. Выявлено уменьшение среднегодовой скорости миграции и аккумуляции твердофазного вещества почв на относительно молодых пашнях по сравнению со староосвоенными территориями, что, вероятно, обусловлено происходящим в последние десятилетия потеплением климата и резким сокращением поверхностного стока в период весеннего снеготаяния. Этот эффект выявлен как для катен южных, так и для катен северных склонов;

– установлено, что на залесенных участках скорость перемещения почвенного вещества относительно небольшая в среднем по катенам, однако в отдельных частях лесных склонов она достигает 8–10 т/га в год, что, скорее всего, связано как с собственной роющей деятельностью животных, так и с вызванной ею зоогенной эрозией;

– выявлено, что склоны южных экспозиций характеризуются более высокой скоростью ЛМТВ почв по сравнению со склонами северной экспозиции. В результате обобщения результатов исследований и предыдущих работ авторов выявлен зональный тренд в изменении количественной характеристики экспозиционного эффекта при проявлениях ЛМТВ почв. В ряду Тульская, Курская и Белгородская области экспозиционный эффект направленно ослабевает: в Тульской области экспозиционные различия составляют 6 раз, в Курской области – 2,5 раза, а в Белгородской области лишь 1,3–2 раза на очень сходных по морфологии склонах;

– в пределах изученных склонов отмечен волнообразный характер миграционно-аккумулятивных кривых. На исследованных распахиваемых склонах, сходных морфологически, выявлено подобие латерального расположения зон с разной интенсивностью миграции и аккумуляции вещества почв при одинаковой экспозиции склонов. Выявлены существенные отличия в длине сегментов склонов с различными проявлениями миграции и аккумуляции твердофазного вещества почв, связанные с разной экспозицией склонов.

Благодарности. Исследование выполнено за счет гранта РГО-РФФИ (проект № 13-05-41158).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Геннадиев А.Н., Жидкин А.П., Олсон К.Р., Качинский В.Л. Эрозия почв в различных условиях землепользования: оценка методом магнитного трассера // Почвоведение. 2010. № 9. С. 1126–1134.
- Геннадиев А.Н., Кошовский Т.С., Жидкин А.П., Ковач Р.Г. Латеральная миграция твердофазного вещества почв в пределах ландшафтно-геохимической арены (метод магнитного трассера) // Почвоведение. 2013. № 10. С. 1–12.
- Геннадиев А.Н., Чернянский С.С., Ковач Р.Г. Сферические магнитные частицы как микрокомпоненты почв и трассеры массопереноса // Почвоведение. 2004. № 5. С. 566–580.
- Голосов В.Н. Эрозионно-аккумулятивные процессы в речных бассейнах освоенных равнин. М.: ГЕОС, 2006. 296 с.
- Голосов В.Н., Геннадиев А.Н., Олсон К.Р. и др. Пространственно-временные особенности развития почвенно-эрозионных процессов в лесостепной зоне Восточно-Европейской равнины // Почвоведение. 2011. № 7. С. 861–869.
- Горшков С.П. Круговорот продуктов денудации суши // Круговорот вещества в природе и его изменение хозяйственной деятельностью человека. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1980. С. 34–55.
- Жидкин А.П. Количественная оценка механической миграции вещества методом магнитного трассера: Автореф. канд. дисс. М., 2010. 26 с.
- Жидкин А.П., Чендев Ю.Г. Обзор существующих представлений об эрозии почв в Белгородской области // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Сер. Естественные науки. 2014. № 23. С. 147–155.
- Кумани М.В. Способы регулирования почвенно-эрозионных процессов и гидрологического режима агроландшафтов Центрально-Черноземной зоны: Автореф. докт. дисс. Курск, 2004. 45 с.
- Литвин Л.Ф. География эрозии почв сельскохозяйственных земель России. М.: ИКЦ «Академкнига», 2002. 255 с.
- Лучицкая О.А., Башкин В.Н. Плодородие почв и рельеф // Почвоведение. 1994. № 9. С. 75–79.
- Перельман А.И. Геохимия ландшафта. М.: Высшая школа, 1961. 496 с; 1975. 340 с.
- Перельман А.И., Касимов Н.С. Геохимия ландшафта: Учеб. пособие. Изд. 3-е, перераб. и доп. М.: Астрель-2000, 1999. 798 с.
- Петелько А.И., Богачёва О.В. Влияние агрофона на сток талых вод: Мат-лы 24-го пленарного межвузовского коорд. совещания по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов. Барнаул: Изд-во Алтайского госуниверситета, 2009. С. 166–169.
- Проценко Е.П. Базовые свойства и режимы почв полярно ориентированных склонов: Автореф. докт. дисс. Курск, 2004. 46 с.
- Чендев Ю.Г., Петин А.Н., Серикова Е.В., Крамчанинов Н.Н. Деградация геосистем Белгородской области в результате хозяйственной деятельности // География и природные ресурсы. 2008. № 4. С. 69–75.

Поступила в редакцию 02.02.2016
Принята к публикации 16.03.2016

A.P. Zhidkin¹, A.N. Gennadiev²,
T.S. Koshovskii³, Yu.G. Chendev⁴

SPATIO-TEMPORAL PARAMETERS OF THE LATERAL MIGRATION OF SOLID-PHASE SOIL MATTER (BELGOROD REGION)

Spatial and temporal parameters of the lateral migration of solid-phase matter (LMSM) of soils were determined for the key sites in Belgorod Region, Russia. We studied virgin forested and arable slopes with different period of plowing. The average annual rates of migration and accumulation of soil solid phase matter decrease on young croplands (plowing period of 100 years) compared to old-arable territories (150 years); both, for south-facing catenae, as well as for north-facing ones. We assessed the characteristics of soil matter transport on virgin forested slopes related to zoogenic factor. The regional trend of the change of slope exposure effect on LMSM of soils was quantitatively characterized. The similarity of the lateral pattern of zones with different intensity of migration and accumulation of soil matter on slopes with similar exposure was revealed. The following segments of catenae distinguished by acceleration or deceleration of LMSM of soils were described: stationary, progressive-migratory, regressive-migratory, stationary-migratory, and accumulative ones.

Keywords: lateral migration, soil erosion, solid-phase matter, exposure of slopes, soil catenae.

Acknowledgements. The study was financially supported by the joint project of the Russian Geographical Society and Russian Foundation for Basic Research (project N 13-05-41158).

REFERENCES

- Chendev Ju.G., Petin A.N., Serikova E.V., Kramchaninov N.N. Degradacija geosistem Belgorodskoj oblasti v rezul'tate hoz'jajstvennoj dejatel'nosti [Degradation of geosystems in the Belgorod region as a result of the economic activities], *Geografija i prirodnye resursy*, 2008, vyp. 29, no 4, pp. 348–353. (in Russian).
- Gennadiev A.N., Chernjanskii S.S., Kovach R.G. Magnetic spherules as soil microcomponents and tracers of mass-transfer processes // *Eurasian soil science*. 2004. N 5. P. 486–499.
- Gennadiev A.N., Koshovskii T.S., Zhidkin A.P., Kovach R.G. Lateral migration of soil solid-phase material within a landscape-geochemical arena detected using the magnetic tracer method // *Eurasian soil science*. 2013. N 10. P. 983–993.
- Gennadiev A.N., Zhidkin A.P., Olson K.R., Kachinskii V.L. Soil erosion under different land uses: assessment by the magnetic tracer method // *Eurasian soil science*. 2010. N 9. P. 1047–1054.
- Golosov V.N. Jerozionno-akkumuljativnye processy v rechnyh bassejnah osvoennyh ravnin [Erosion-accumulative processes in river basins of cultivated plains], Moscow, GEOS, 2006, 296 p. (in Russian).
- Golosov V.N., Gennadiev A.N., Olson K.R. et al. Spatial and temporal features of soil erosion in the forest-steppe zone of the east-european plain // *Eurasian soil science*. 2011. N 7. P. 794–801.
- Gorshkov S.P. Krugovorot produktov denudacii sushi [Circulation of products of land denudation], *Krugovorot veshhestva v prirode i ego izmenenie hoz'jajstvennoj dejatel'nosti cheloveka*, Moscow, Izd-vo Mosc un-ta, 1980, pp. 34–55 (in Russian).
- Kumani M.V. Sposoby regulirovanija pochvenno-jerozionnyh processov i gidrologicheskogo rezhima agrolandshaftov Central'no-Chernozemnoj zony [Methods of regulation of hydrological regime of croplands in Central-Chernozem region]: Avtoref. doct. dis. Kursk, 2004, 45 p. (in Russian).
- Litvin L.F. Geografija jerozii pochv sel'skohoz'jajstvennyh zemel' Rossii [Geography of soil erosion of arable lands of Russia], Moscow, IKC «Akademkniga», 2002, 255 p. (in Russian).
- Luchickaja O.A., Bashkin V.N. Plodorodie pochv i rel'ef [Soil fertility and relief], *Pochvovedenie*, 1994, no 9, pp. 75–79 (in Russian).
- Perel'man A.I. Geohimija landshafta [Geochemistry of landscapes], Moscow, Vysshaja shkola, 1961, 496 p. (in Russian).
- Perel'man A.I. Geohimija landshafta [Geochemistry of landscapes], Moscow, Vysshaja shkola, 1975, 340 p. (in Russian).
- Perel'man A.I., Kasimov N.S. Geohimija landshafta: Uchebnoe posobie. [Geochemistry of landscapes: educational book], Moscow, Astreja-2000, 1999, 798 p. (in Russian).
- Petel'ko A.I., Bogachjova O.V. Vlijanie agrofona na stok talyh vod [Influence of cultivation on melt-water run-off], *Mat-ly 24-go plenarnogo mezhvuzovskogo koordinacionnogo soveshhanja po probleme jerozionnyh, ruslovyh i ust'evykh processov*. Barnaul, izd-vo Altajskogo gosuniversiteta, 2009, pp. 166–169 (in Russian).
- Procenko E.P. Bazovye svojstva i rezhimy pochv poljarno orientirovannyh sklonov [Basic properties and regimes of soils of polar-oriented slopes]: Avtoref. dokt. dis. Kursk, 2004, 46 p. (in Russian).
- Zhidkin A.P. Kolichestvennaja ocenka mehanicheskoj migracii veshhestva metodom magnitnogo trassera [Quantitative assessment of mechanical migration of soil matter by magnetic tracer method]: Avtoref. kand. diss., Moscow, 2010, 26 p. (in Russian).
- Zhidkin A.P., Chendev Ju.G. Obzor sushhestvujushih predstavlenij ob jerozii pochv v Belgorodskoj oblasti [Review of current approaches of soil erosion in Belgorod region, Russia], *Nauchnye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Serija Estestvennye nauki*. 2014, no 23, pp. 147–155 (in Russian).

Received 02.02.2016

Accepted 16.03.2016

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Landscape Geochemistry and Soil Geography, Research Scientist, PhD in Geography; e-mail: gidkin@mail.ru

² Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Landscape Geochemistry and Soil Geography, Professor, D.Sc. in Geography; e-mail: alexagenna@mail.ru

³ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Landscape Geochemistry and Soil Geography, Engineer; e-mail: tkvz@ya.ru

⁴ Belgorod State University, Faculty of Mining and Environmental Management, Head of Laboratory, D.Sc. in Geography; e-mail: sciences@mail.ru

УДК 550.42:631.435(470.318)

О.А. Самонова¹, Н.С. Касимов², Е.Н. Асеева³**МЕТАЛЛЫ В ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКИХ ФРАКЦИЯХ ПОЧВ ОВРАЖНОЙ СИСТЕМЫ (ЮГО-ВОСТОЧНАЯ ЧАСТЬ СМОЛЕНСКО-МОСКОВСКОЙ ВОЗВЫШЕННОСТИ)**

Изучено латеральное распределение Fe, Mn, Ti, Zr, Ni, Co, Cr, Zn, Pb во фракциях 1–0,25; 0,25–0,05; 0,05–0,01; 0,01–0,001 и <0,001 мм в гумусовых горизонтах почв овражной системы в бассейне р. Протва (лесная зона). Металлы накапливаются в определенных гранулометрических фракциях почв: Ti – во всех пылеватых, Zr – в крупнопылеватой фракции; Zn и Pb – в физической глине; Mn, Co, Ni, Cr, Fe – в илистой фракции; второй максимум этих элементов установлен в крупном и среднем песке. С размерностью фракции связаны вариabельность содержания металлов и распределение в системе почв – от водосборной области оврага к его склонам, днищу и конусу выноса. Относительно равномерно распределены элементы в илистой, а также в средне- и мелкопылеватой фракциях и более контрастно в песчаных фракциях. Латеральные изменения концентрации металлов обусловлены разным генезисом (песчаные фракции) и дифференциацией вещества в процессе его миграции (песчаные, пылеватые и илистая фракции).

Ключевые слова: металлы, гумусовые горизонты почв, гранулометрические фракции, механическая миграция, латеральное распределение.

Введение. Геохимический анализ природных систем на региональном и локальном уровнях базируется на изучении латеральных миграционных потоков. В речных бассейнах перемещение твердого материала со склонов междуречий в долины рек осуществляется в основном по оврагам и балкам [Голосов, 2006]. Большое значение в миграции вещества в таких системах имеет суспензионный сток частиц разной размерности, что определяет необходимость анализировать поведение элементов в отдельных гранулометрических фракциях. Актуальность и практическая значимость распределения тяжелых металлов по фракциям почв в овражно-балочных системах связаны с возможностью их аккумуляции и последующего выноса в подчиненные ландшафты речных долин.

Овражно-балочная сеть хорошо развита в бассейне р. Протва, в юго-восточной части Смоленско-Московской возвышенности, сложенной моренными и покровными суглинками. Большинство оврагов на этой территории относится к эрозионным формам, которые формировались в конце плейстоцена под влиянием изменения естественной ландшафтно-климатической обстановки. Детальные геоморфологические исследования на изучаемой территории выявили две возрастные генерации оврагов – плейстоценовые и голоценовые, отличающиеся по морфологии и истории развития [Панин и др., 2009]. В работах [Самонова, Асеева, 2010; Самонова и др., 2011] проанализировано пространственное распределение содержания металлов и основных по-

верхенно-геохимических показателей в поверхностном горизонте почв двух типичных и хорошо изученных в геоморфологическом отношении каскадных ландшафтно-геохимических систем, включающих водосборную область, склоны, днище и конус выноса и относящихся к разным возрастным генерациям, – голоценового оврага и плейстоценовой балки. Транзит металлов в этих системах происходит с илстыми и пылеватыми частицами; рассеяние и аккумуляция металлов зависят в основном от морфологии систем и литогеохимического состава слагающих их отложений, а распределение металлов в поверхностных горизонтах почв связано с их гранулометрическим составом [Samonova et al., 2014; Самонова, Асеева, 2012].

В большинстве работ, посвященных вопросам фракционного анализа химических элементов в почвах, содержится характеристика тонких гранулометрических фракций, к которым часто приурочен максимум содержания металлов, концентрирующихся в тонкодисперсных глинистых минералах с высокой поглотительной способностью [Förstner, 1982; Huang et al., 2014]. В крупных фракциях они аккумулируются лишь при наличии большого количества тяжелых минералов [Протасова, 2003]. Влияние почвообразующих пород и свойственных им ассоциаций тяжелых минералов на микроэлементный состав гранулометрических фракций почв подробно рассмотрено в [Acosta et al., 2011], а воздействие некоторых почвообразовательных процессов (текстульная дифференциация почв и гумусонакопление) на изменение кон-

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра геохимии ландшафтов и географии почв, вед. науч. с.; канд. геогр. н.; e-mail: oasamonova@mail.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра геохимии ландшафтов и географии почв, зав. кафедрой, докт. геогр. н., академик РАН; e-mail: nskasimov@mail.ru

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра геохимии ландшафтов и географии почв, ст. науч. с., канд. геогр. н.; e-mail: asejeva@mail.ru

центрации элементов в определенных фракциях в почвенном профиле – в работах [Синкевич, Стрижова, 1966; Тонконогов и др., 1987; Титова и др., 1996; Самонова, Асеева, 2006; Hardy, Cornu, 2006].

Мы анализировали распределение химических элементов в гранулометрических фракциях почв оврага и его водосбора – каскадной системе локального уровня. Цель исследования – выявить основные закономерности латеральной дифференциации Fe, Mn, Ti, Zr, Ni, Co, Cr, Zn, Pb во фракциях размером 1–0,25; 0,25–0,05; 0,05–0,01; 0,01–0,001 и <0,001 мм в гумусовых горизонтах почв овражной системы и факторы, ее определяющие. Работа представляет собой следующий этап более детального анализа поведения металлов в малой эрозионной форме – овраге.

Латеральная (*L*) миграция, присущая объекту исследования, расположенному в бассейне р. Протва, происходит в условиях литологически и генетически неоднородного субстрата, который определяет основные черты его исходной геохимической структуры. В зависимости от формы нахождения химических элементов их перемещение происходит в основном по поверхности почвы в виде растворов и суспензий [Касимов и др., 2002; Samonova et al., 2014]. Именно в гумусовых горизонтах почв геохимическая дифференциация гранулометрических фракций, сопровождающая процессы механического перемещения вещества (сортировка, выветривание, диспергирование частиц, осаждение элементов из растворенной фазы при ионообменных реакциях, сорбции и т.д.), проявляется максимально активно.

Материалы и методы исследований. Исследован овраг Волчий, расположенный на юго-восточном склоне Смоленско-Московской возвышенности, в центральной части бассейна р. Протва, на территории Сатинского учебного полигона географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова. Это один из 4-х оврагов на исследованной территории, сформировавшихся во второй половине голоцена под влиянием гидроклиматических причин и экстремального проявления ливневой активности. Овраг Волчий заложен на левом коренном берегу долины р. Протва с крутизной 7–10°, в отличие от более древних овражных систем он имеет водосбор очень небольшой площади ($S=1,7$ га) и малую протяженность – около 200 м (рис. 1), в плане представлен простой ромбовидной формой. Он имеет на всем протяжении четкие бровки и прямые склоны крутизной от 20 до 50°, V-образный, а в приустьевой части – U-образный поперечный профиль. В верхней части овраг прорезает маломощные покровные суглинки, флювиогляциальные пески и сильноопесчаненную московскую морену; в средней части углубляется в легкоразмываемую 15-метровую толщу водно-ледниковых песков и алевритов, частично вскрывая верхнюю часть тяжелосуглинистой, насыщенной крупнообломочным материалом днепровской морены. В целом продольный профиль имеет правильную вогнутую форму [Панин и др., 2009], глубина оврага в средней части достигает 8 м. Продукты эрозионной деятельности оврага

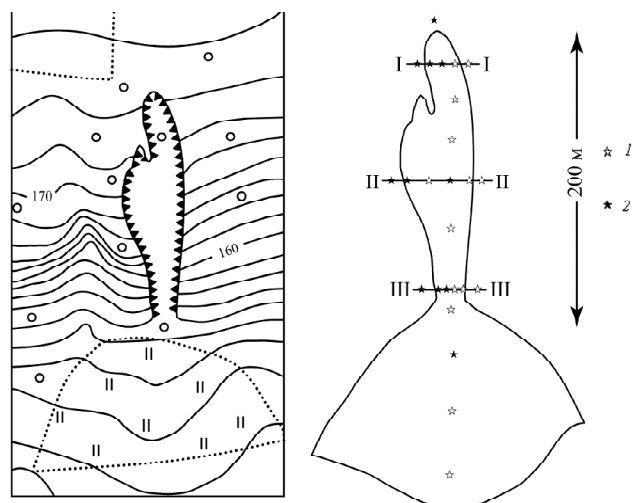


Рис. 1. Фрагмент топографической карты (горизонталы проведены через 2 м) и схема отбора проб в гумусовых горизонтах почв овра. Волчий и его конуса выноса. Римские цифры – катены, начинающиеся выше бровок и пересекающие склоны оврага и его днище.

1 – места отбора проб; 2 – места отбора проб, для которых в отмытых гранулометрических фракциях определено содержание металлов

Fig. 1. The segment of a topographic map (contour lines drawn at 2 m interval) and the scheme of the gully with sampling sites. Roman numerals correspond to cross sections stretching from beyond the gully edge through its sides to its bottom.

1 – sampling sites, 2 – sites where concentrations of metals were measured not only in bulk soil sample, but also in grain-size fractions

полно представлены на конусе выноса, наложенном на пойму. Это связано с тем, что борта долины на этом участке не были подвержены размыву рекой в течение всего голоцена [там же]. В настоящее время овраг не проявляет признаков активности.

Водосборная территория овра. Волчий – трансэлювиальный ландшафт с еловым землянично-овсянищевым сообществом на дерново-среднеподзолистых почвах. Окружающие овраг склоны коренного берега р. Протва покрыты еловыми, елово-березовыми и елово-сосновыми мертвopoкpoвными сообществами на дерново-слабоподзолистых почвах. Склоны и днище оврага заняты кустарниковыми сообществами из черемухи и бересклета на дерновых и дерновых слаборазвитых почвах [Герасимова, Исаченкова, 2003], на конусе выноса под луговым землянично-клеверо-злаковым сообществом развиты дерновые среднемощные почвы.

В ландшафтно-геохимическом отношении овраг представляет собой каскадную систему склоны → днище → конус выноса, взаимодействующую с окружающими трансэлювиальными ландшафтами водосборной области и склонов долины р. Протва. Элементарные ландшафты днища, расположенные на разных уровнях рельефа (от верховьев к низовьям), с изменяющимися растительными сообществами и гранулометрическим составом почв также образуют каскадную систему.

Перпендикулярно простиранию оврага в среднем через 100 м заложено 3 ландшафтно-геохими-

ческих профиля, пересекающих борта оврага и днище. Из гумусового горизонта (0–10 см) отобраны пробы в водосборной области и на склонах долины р. Протва, окружающих овраг (в 2–3 м от бровки оврага), на средних частях склонов оврага, в днище и на конусе выноса. По днищу пробы между профилями отбирали через 35–40 м. Во всех пробах определены величины $pH_{КС}$, содержание $C_{орг}$ (по Тюрину). Гранулометрический анализ выполнен пирофосфатным методом. Распределение валового содержания металлов и их подвижных форм в гумусовых горизонтах почв овражной системы, исследованное по данным анализа 25 проб, которые в целом характеризуют систему, описано в [Samonova et al., 2014].

Для изучения содержания и латерального распределения металлов в гранулометрических фракциях выбрано 11 проб, характеризующих почвы водосборной области, которая примыкает к правому склону (борту) оврага, а также из правого склона, из днища от верховьев к низовьям и конуса выноса (рис. 1). В почвах правого склона оврага наблюдалось более равномерное распределение геохимических параметров, чем в почвах левого склона, описанных ранее [Samonova et al., 2014]. Предполагается, что для отдельных фракций эта ситуация не изменится, что позволит корректнее интерпретировать результаты средних значений геохимических параметров для коротких выборок (в среднем 3 пробы в каждой фракции из почв разных ландшафтов оврага) и повысить точность определения средних.

В этих пробах (всего 55 проб) выделены гранулометрические фракции (мм) 1–0,25; 0,25–0,05; 0,05–0,01; 0,01–0,001 и <0,001 методом отмучивания водой (химическая лаборатория Института географии РАН, Е.А. Агафонова). Масса каждой фракции составляла 3–5 г. Количественным спектральным ме-

гумуса и величины pH , а также значения коэффициента корреляции Спирмена для выявления линейных закономерностей изменения концентраций элементов вдоль днища оврага [Дмитриев, 1995]. Выполнена статистическая оценка распределения содержания металлов по гранулометрическим фракциям в общей выборке, состоящей из 11 проб для каждой фракции. Латеральное распределение металлов в гранулометрических фракциях почв оврага оценивали с использованием коэффициента латеральной дифференциации (L), равного отношению среднего содержания элемента в данной выборке (склон, днище и т.д.) к его содержанию в почвах водосбора (трансэлювиальные ландшафты, окружающие овраг).

Результаты исследований и их обсуждение.
Латеральное распределение гранулометрических фракций и гумуса в поверхностном горизонте почв оврага. Гранулометрический состав гумусовых горизонтов почв и содержание гумуса приведены в табл. 1. Содержание фракции крупного и среднего песка увеличивается от трансэлювиальных ландшафтов территории, окружающей овраг, к конусу выноса от 4,2 до 31,8% из-за врезания оврага в песчаные флювиогляциальные отложения, а содержание илистой и пылеватых фракций уменьшается (рис. 2). Для всех фракций (за исключением илистой) выявлены статистически достоверные линейные тренды изменения их содержания вдоль днища – для крупного, среднего песка и мелкого песка положительные ($r=1$, $r=0,8$ соответственно), для крупной, средней и мелкой пыли – отрицательные ($r=-0,9$; $p=0,04$), что свидетельствует о накоплении песчаных фракций и одновременном рассеянии более мелких фракций.

Вариации содержания гумуса (от 1,4 до 7,1%) в большой степени определяются развитостью дер-

Таблица 1

Среднее содержание гумуса и гранулометрических фракций (%) в гумусовом горизонте почв правого борта оврага Волчий

Почвы элементов рельефа оврага*	Гумус, %	Гранулометрическая фракция, мм						
		1,0–0,25	0,25–0,05	0,05–0,01	0,01–0,001	<0,001	$\Sigma>0,01$	$\Sigma<0,01$
Дерново-средне- и слабоподзолистые почвы водосбора (4)	3,5	4,2	14,7	50,6	19	11,6	69,4	30,6
Дерновые почвы склонов оврага (3)	4,8	15,5	25,8	29,9	15,8	13,1	71,2	28,8
Дерновые слаборазвитые почвы днища (3)	4,6	21,7	22,2	34,4	12,7	9,0	78,3	21,7
Дерновые среднелощинные конуса выноса (1)	3,3	31,8	23,2	25,8	8,3	10,8	80,8	19,1

* В скобках – число проб.

тодом проанализировано содержание Mn, Ni, Co, Cr, Zn, Pb, Ti, Zr, Fe (Бронницкая геолого-геохимическая экспедиция Института минералогии, геохимии и кристаллохимии редких элементов, ИМГРЭ).

Рассчитаны средние арифметические значения содержания гранулометрических фракций, металлов,

нового процесса и зависят от проективного покрытия растительностью – максимальное содержание гумуса приурочено к задернованным почвам склонов оврага, что подтверждает возможность накопления почвенного материала на склонах в результате сползания верхнего почвенного горизонта [Ажи-

гиров и др., 1987; Геннадиев и др., 2008; Голосов, 2006]. Между содержанием органического вещества и фракцией средней и мелкой пыли существует достоверная положительная корреляция, что согласуется с данными о накоплении гумуса во фракциях мелкой пыли и ила [Кузнецов, 2004]. В днище оврага – от верховьев к низовьям – проявляется линейный тренд уменьшения содержания гумуса, совпадающий с распределением пылеватых частиц и физической глины [Самонина, Асеева, 2010].

Содержание металлов в гранулометрических фракциях почв оврага. В почвах, не подверженных техногенному воздействию, содержание металлов зависит от минералогического состава отдельных фракций и степени их трансформации в процессе выветривания и почвообразования [Побединцева, 1975; Förstner, 1982; Добровольский, 1983; Anda et al., 2009; Acosta et al., 2011]. В общей выборке проб выявлена приуроченность повышенных значений концентрации металлов к частицам определенной размерности. Титан концентрируется во всех пылеватых фракциях, Zr – в крупнопылевой (рис. 3). Повышенное содержание Ti и Zr в фракции крупной пыли, по-видимому, связано с накоплением в этой фракции устойчивых акцессорных минералов (сфен, рутил, циркон), характерных для четвертичных отложений на территории исследования [Комплексный..., 1992]. В отдельных случаях Zr накапливается в фракции мелкого песка, что также связано с присутствием в ней циркона [Побединцева, 1975; Berrow, Mitchel, 1991; Anda et al., 2009].

Максимум содержания Pb приходится на среднюю и мелкопылеватую фракцию, Zn – на илистую, в более крупных фракциях они не накапливаются (рис. 3), что описано в [Пляскина, Ладонин, 2005; Hardy, Cornu, 2006].

Для илистой фракции гумусовых горизонтов почв характерно высокое содержание Fe, Mn, Co, Ni, Cr [Баршал и др., 1993; Титова и др., 1996; Huang et al., 2014; Berrow, Mitchel, 1991; Hardy, Cornu, 2006]. В распределении этих металлов часто наблюдается второй максимум, приуроченный к фракции крупного и среднего песка, а их среднее содержание минимально (кроме Cr) в фракции крупной пыли, что связано с возможным эоловым генезисом этой фракции и (или) преобразованием при выветривании. В почвах некоторых регионов в пылеватых фракциях из-за особенностей их минералогического состава, напротив, отмечается повышенное содержание Co, Ni [Синкевич, Стрижова, 1966; Hardy, Cornu, 2006; Побединцева, 1975].

Вариабельность содержания металлов зависит от размерности фракций. Она максимальна в фракции крупного и среднего песка, где коэффициент вариации (Cv) для большинства элементов составляет более 50%, а для Ti и Mn – 101 и 128%

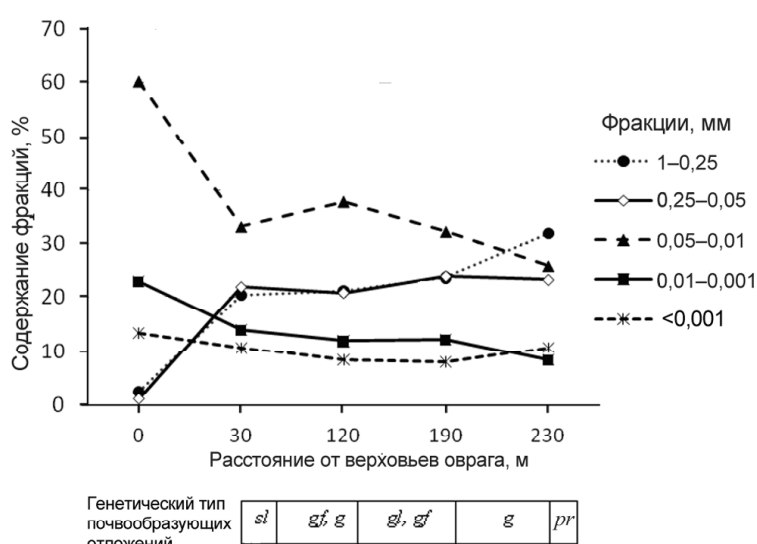


Рис. 2. Распределение гранулометрических фракций в гумусовом горизонте почв днища оврага от верховьев к конусу выноса и генетические типы почвообразующих отложений: *sl* – покровные суглинки, *gf* – флювиогляциальные пески, *gl* – озерно-ледниковые отложения (алевролиты), *g* – завалуненные моренные суглинки, *pr* – современные пролювиальные отложения

Fig. 2. Distribution of grain-size fractions in humus horizons along the gully bottom from its headcuts to the fan and genetic types of soil parent material: *sl* – mantle loams; *gf* – glacio-fluvial sands; *gl* – lacustrine deposits (silt and fine sand); *g* – glacial till (stony loam), *pr* – fan alluvium

соответственно, и лишь для Pb – ~30%. В фракции мелкого песка значения Cv для Ti, Mn, Cr, Zr, Co уменьшаются, но увеличиваются для Ni, Zn, Fe. В пылеватых фракциях значения коэффициента вариации для всех металлов (кроме Fe и Mn) уменьшаются. В илистой фракции значение Cv минимально для большинства элементов – 15–29% (за исключением Mn, для которого вариабельность содержания в 2–3 раза выше, Cv=50%). Самые низкие значения коэффициента вариации в пылеватых и илистой фракциях (8%) характерны для Cr. Низкая вариабельность содержания элементов в тонких фракциях объясняется их относительно однородным химическим составом, что связано с преобладанием вторичных глинистых минералов и максимальным преобразованием почвенными процессами.

Латеральное распределение металлов в гранулометрических фракциях почв оврага. Фракция крупного и среднего песка (1–0,25 мм). Максимальное содержание всех элементов (за исключением Ti) установлено в почвах водосбора (табл. 2). Почвы внутренних частей оврага (здесь и далее – склонов и днища), как правило, значительно обеднены металлами. Рассеяние элементов происходит в почвах склонов оврага: $Mn_{0.2}Zn_{0.3}Co_{0.3}Ni_{0.4}Cr_{0.5}Fe_{0.6}Zr_{0.6}Pb_{0.7}$ (числовой индекс здесь и далее – значение коэффициента латеральной дифференциации *L*). Относительно склонов в днище содержание Zn, Ni, Cr увеличивается в 1,5–2 раза; содержание других элементов изменяется мало. Для Zr характерно относительно равномерное распределение внутри оврага (рис. 4).

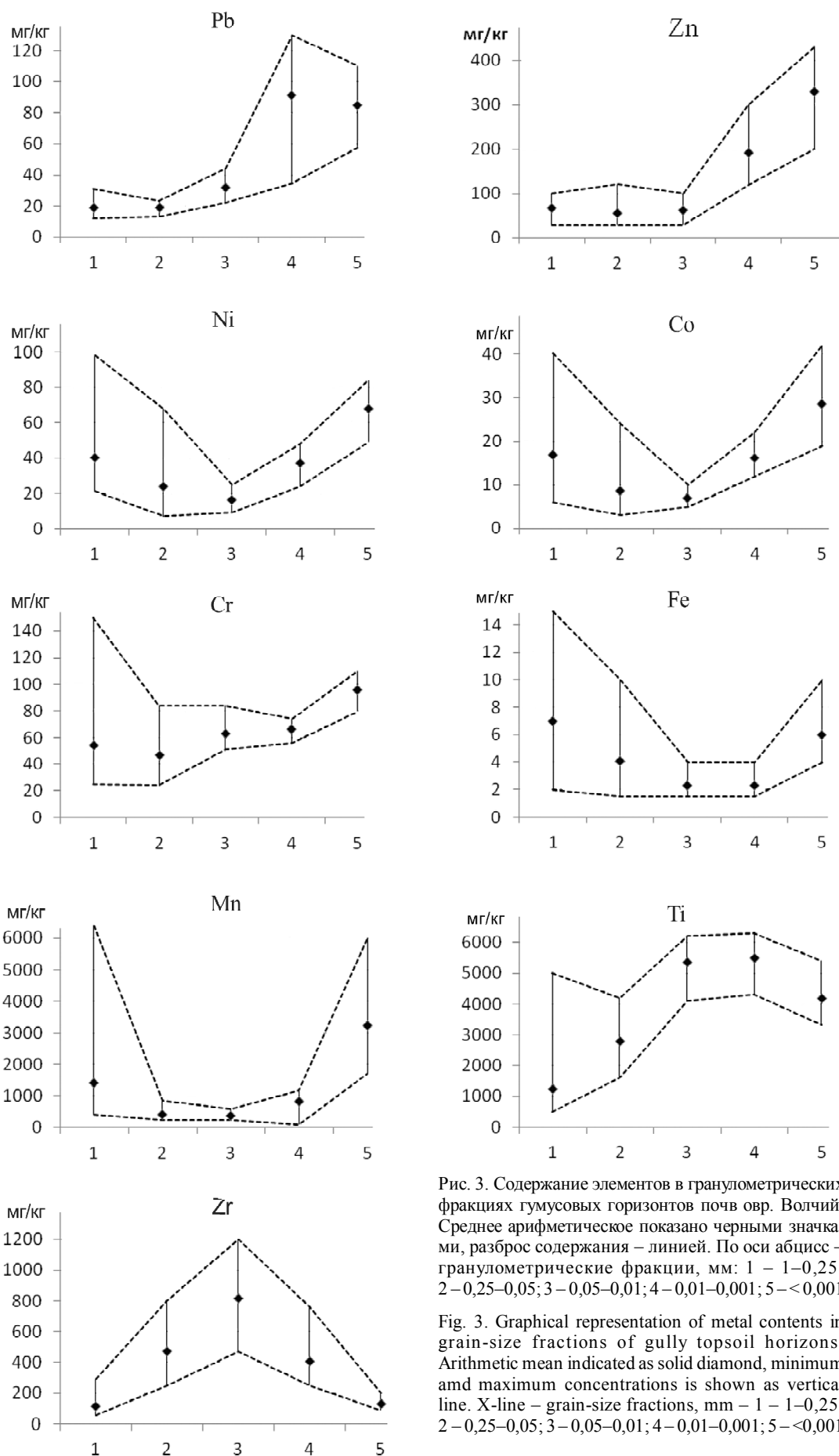


Рис. 3. Содержание элементов в гранулометрических фракциях гумусовых горизонтов почв овра. Волчий. Среднее арифметическое показано черными значками, разброс содержания – линией. По оси абсцисс – гранулометрические фракции, мм: 1 – 1–0,25; 2 – 0,25–0,05; 3 – 0,05–0,01; 4 – 0,01–0,001; 5 – <0,001

Fig. 3. Graphical representation of metal contents in grain-size fractions of gully topsoil horizons. Arithmetic mean indicated as solid diamond, minimum and maximum concentrations is shown as vertical line. X-line – grain-size fractions, mm – 1 – 1–0,25; 2 – 0,25–0,05; 3 – 0,05–0,01; 4 – 0,01–0,001; 5 – <0,001

Таблица 2

Среднее содержание* металлов (мг/кг) в гранулометрических фракциях и общей почвенной массе гумусовых горизонтов почв овр. Волчий

Элементы системы**	Фракция, мм											
	1–0,25				0,25–0,05				0,05–0,01			
	В	СКЛ	ДН	КВ	В	СКЛ	ДН	КВ	В	СКЛ	ДН	КВ
Zn	80	20	63	20	38	20	75	20	53	73	70	50
Pb	22	16	19	12	19	19	20	13	30	37	31	24
Co	30	10	10	6	13	5	8	3	6	8	8	5
Ni	63	23	34	22	35	12	24	15	12	17	21	18
Cr	78	35	53	25	59	36	50	24	61	73	61	52
Mn	2810	607	670	450	523	283	450	250	283	447	433	330
Ti	900	810	893	5000	3050	2767	2900	1600	5525	4733	5500	6200
Zr	160	93	87	80	610	397	447	250	860	737	787	1000
Fe, %	10,3	6	5,3	2	6	2,5	4	1,5	1,6	2,7	3	1,5
Элементы системы	Фракция, мм											
	0,01–0,001				<0,001				Общая почвенная масса горизонтов			
	В	СКЛ	ДН	КВ	В	СКЛ	ДН	КВ	В	СКЛ	ДН	КВ
Zn	190	200	190	190	338	350	320	280	80	100	80	60
Pb	89	93	97	80	92	86	83	60	30	20	20	20
Co	16	18	15	16	32	24	28	33	10	10	10	10
Ni	36	37	38	43	74	61	73	52	30	30	30	30
Cr	67	67	65	70	96	103	95	80	40	50	50	30
Mn	788	1050	627	880	4475	2067	2867	2800	550	400	600	400
Ti	5450	5200	5767	5800	4350	4033	3867	5000	3500	3000	3000	2000
Zr	420	373	477	260	153	130	100	130	350	300	200	200
Fe, %	3	3,7	2,3	4	6,8	4,7	5,7	8	–	–	–	–

Примечания. В – водосборная область (4); СКЛ – склоны оврага (3); ДН – днище оврага (3); КВ – конус выноса (1), в скобках – число проб. * Среднее арифметическое для фракций, медианное значение для общей почвенной массы горизонтов; ** элементы системы. Полу жирным выделено максимальное среднее содержание элемента в фракции.

Минимальные значения концентрации Pb, Co, Cr, Mn, Zr, Fe приурочены к конусу выноса. Здесь же отмечается накопление Ti, что свидетельствует об изменении минералогического состава фракции в процессе транспортировки песчаных осадков и их переотложения, увеличения в ней доли кварца и устойчивых акцессорных минералов [Шванов, 1987].

Вдоль днища оврага происходит уменьшение содержания металлов от верховьев овражной системы к ее низовьям, что хорошо согласуется с результатами *L*-анализа и выводом о возможности рассеяния металлов в этой фракции в процессе транспортировки частиц по днищу к конусу выноса. Достоверные линейные отрицательные тренды ($r=-1$ и $r=-0,9$; $p<0,05$) установлены для Mn, Pb и Co; менее

отчетливо они выражены для Fe, Zr и Cr ($r=-0,8$ для Fe и $r=-0,7$ для Zr и Cr).

Фракция мелкого песка (0,25–0,05 мм). Максимальное содержание большинства элементов (за исключением Zn) наблюдается в почвах водосбора (рис. 4). Уменьшаясь в почвах склонов оврага (Ni, Co, Fe_{0,4}, Zn, Mn_{0,5}, Cr_{0,6}, Zr_{0,7}), содержание большинства из них относительно склонов увеличивается в днище системы: Ni, Fe, Mn, Co, Cr – в 1,5–2 раза, а Zn – в 3,8 раза. Уменьшение содержания на склонах (по сравнению с фракцией крупного и среднего песка) происходит менее резко для Mn, Zn, Cr, но более интенсивно для Fe, а накопление Zn в днище приводит к двукратному превышению его содержания относительно почв водосбора (табл. 2). Между склонами и днищем Zr, Ti и Pb распределены равно-

мерно. В почвах конуса выноса минимально содержание Fe, Zr, Ti, Mn, Cr, Co, Pb (табл. 2).

Концентрация Fe уменьшается вдоль днища оврага. Высокое значение коэффициента корреляции ($r=-0,9$; $p=0,04$) свидетельствует о рассеянии этого элемента от верховьев к низовьям оврага, возможно, в процессе транспортировки частиц фракции. Менее достоверные линейные тренды рассеяния выявлены в распределении содержания Mn, Co, Ni, Zr ($r=-0,7$; $p=0,19$).

Таким образом, латеральная геохимическая дифференциация фракции мелкого песка мало отличается от дифференциации фракции крупного и среднего песка. В обеих песчаных фракциях прослеживается влияние литогенного фактора, определяющего меньшую концентрацию металлов в почвах внутренних частей оврага по сравнению с водосбором. Внутри овражной системы в этих фракциях происходит накопление многих элементов в днище и их рассеяние в почвах конуса выноса.

Фракция крупной пыли (0,05–0,01 мм). В крупной пыли, в отличие от песчаных фракций, повышенное содержание элементов приурочено преимущественно к почвам внутренней части оврага – его склонам (бортам) и днищу. В почвах склонов оврага содержание большинства металлов относительно водосбора увеличивается Fe, Mn_{1,6}, Ni, Zn_{1,4}, Co, Pb_{1,3}, Cr_{1,2}, а Ti и Zr не меняется. Почвы склонов и днища почти не отличаются по содержанию металлов (рис. 4). Более заметные изменения состава фракции наблюдаются при переходе к почвам конуса выноса, где, как и в песчаных фракциях, Fe, Co, Zn, Mn, Pb, Cr, Ni, рассеиваются, а Ti и Zr накапливаются (рис. 4).

Для большинства элементов линейные тренды изменения концентраций вдоль днища отсутствуют, за исключением Pb, содержание которого уменьшается вниз по днищу оврага ($r=-0,72$; $p=0,17$).

Фракция средней и мелкой пыли (0,01–0,001 мм). В почвах склонов оврага и водосбора отмечаются близкие значения концентрации Pb, Cr, Ti, Zn, Co и Zr (рис. 4). Содержание Mn и Fe увеличивается на склонах оврага в 1,3 и 1,2 раза соответственно.

В почвах внутренних частей оврага (рис. 4) сохраняется относительно равномерное распределение Pb, Cr, Ti, Zn, Co, более контрастно ведут себя Mn и Fe. В системе склоны→днище→конус выноса концентрация Mn и Fe сначала уменьшается, а затем в почвах конуса выноса увеличивается в 1,7 и 1,4 раза соответственно. Zr распределен относительно равномерно между склонами и днищем, однако на конусе выноса его содержание уменьшается в 1,8 раза. Относительно почв водосбора в почвах конуса выноса слабо накапливаются Fe и Ni (в 1,3 раза).

В распределении металлов вдоль днища оврага в составе этой фракции, в отличие от более крупных фракций, выявляются положительные линейные тренды, в частности в поведении Ni ($r=1,0$; $p<0,001$) и с меньшей степенью достоверности Mn ($r=0,72$; $p=0,17$), что указывает на накопление этих элементов от верховьев к низовьям системы.

Таким образом, фракция средней и мелкой пыли имеет относительно однородный геохимический состав по сравнению с более крупными фракциями, что свидетельствует об ее одинаковом генезисе и/или преобразовании процессами выветривания. Латеральное изменение геохимического состава этой фракции, где значительно повышается доля вторичных минералов [Минкина и др., 2011], проявляется в виде вариации содержания Mn и Fe, что, возможно, связано с перераспределением их подвижных соединений.

Илистая фракция (<0,001 мм). Большинство элементов распределено равномерно, за исключением Mn и Fe, содержание которых в почвах водосбора выше, чем на склонах оврага (рис. 4), в 2,2 и 1,4 раза соответственно.

Между склонами и днищем оврага различия в содержании отчетливо проявляются только для Mn (рис. 4). Для других элементов, в том числе Fe, вариации выражены очень слабо (1,1–1,2 раза). К конусу выноса содержание Fe увеличивается (рис. 4), Mn – практически не меняется, а концентрация Ni и Pb в почвах конуса выноса по сравнению с днищем меньше в 1,4 раза, а Cr и Zn – в 1,2 раза.

Среди металлов в распределении содержания вдоль днища, от верховьев к низовьям оврага, отрицательный линейный тренд прослеживается лишь для Pb и Mn, но выражен он с невысокой степенью достоверности ($r=-0,8$; $p=0,10$).

В целом илистая фракция отличается слабым изменением содержания металлов в почвах внешней и внутренней частей оврага. Изменение ее геохимического состава связано в основном с вариациями содержания Mn и Fe. С песчаными фракциями ее сближает тип распределения металлов в системе почвы водосбора – почвы склонов, а также по днищу от верховьев к низовьям оврага, а с фракцией средней и мелкой пыли – накопление Fe в почвах конуса выноса.

Выводы:

– по особенностям распределения металлов между гранулометрическими фракциями в гумусовых горизонтах почв оврага выделяются три группы элементов: первая – Ti и Zr, накапливающиеся в пылеватых фракциях (Ti – во всех пылеватых фракциях, Zr – в крупнопылевой); вторая – Zn и Pb, содержание которых больше в физической глине; третья – Fe, Mn, Co, Ni, Cr с повышенным содержанием в илистой фракции и вторым максимумом во фракции крупного и среднего песка;

– вариабельность содержания большинства металлов в гранулометрических фракциях снижается в ряду песок→пыль→ил. Латеральное изменение содержания металлов в фракциях связано с разным генезисом фракций (преимущественно песчаных) в почвах водосбора и внутренних частей оврага и преобразованием в процессе миграции (песчаные, пылеватые и илистая фракции);

– песчаные фракции в почвах на покровных суглинках водосбора характеризуются более высоким содержанием металлов, чем почвы внутренних ча-

стей оврага на флювиогляциальных и гляциальных отложениях; повышенная концентрация элементов в фракции крупной пыли приурочена преимущественно к почвам склонов и днища оврага, что, возможно, связано с перераспределением Fe и Mn;

– латеральное изменение фракции средней и мелкой пыли и илистой фракции в гумусовых горизонтах почв гетеролитной системы слабое, проявляется лишь в виде вариаций содержания Mn и Fe вследствие высокой подвижности их соединений в почвах лесной зоны;

– рассеяние большинства металлов в почвах конуса выноса обусловлено преобразованиями минералогического состава почвенного материала в

процессе его транспортировки по днищу оврага и наиболее контрастно проявляется во фракциях физического песка, где одновременно происходит накопление элементов, связанных с устойчивыми акцессорными минералами; Ti накапливается в крупном и среднем песке, Zr – в крупнопылевой фракции. В тонких фракциях выявлена аккумуляция Fe, обусловленная его миграционной активностью;

– результаты анализа позволяют корректнее интерпретировать роль гранулометрического фактора и выявлять индикационные свойства каждой фракции для решения научных и практических задач геохимии ландшафтов.

Благодарности. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-27-00083).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ажигиров А.А., Голосов В.Н., Добровольская Н.Г.* и др. Исследование стока воды и наносов на склоновых водосборах в бассейне р. Протвы. М.: ВИНТИ, 1987. № 6389-B87. 175 с.
- Варшал Г.И., Велюханова Т.К., Кошечева И.Я.* Геохимическая роль гуминовых кислот в миграции элементов // Гуминовые вещества в биосфере. М.: Наука, 1993. С. 97–117.
- Геннадиев А.Н., Голосов В.Н., Маркелов М.В.* и др. Разработка метода разновозрастных трассеров для оценки стадийности почвенно-эрозионных процессов // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2008. № 3. С. 24–31.
- Герасимова М.И., Исаченкова Л.Б.* Почвы и почвенный покров Сатинского учебного полигона. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2003. 39 с.
- Голосов В.Н.* Эрозионно-аккумулятивные процессы в речных бассейнах освоенных равнин. М.: ГЕОС, 2006. 296 с.
- Добровольский В.В.* География микроэлементов. Глобальное рассеяние. М.: Мысль, 1983. 272 с.
- Дмитриев Е.А.* Математическая статистика в почвоведении. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1995. 320 с.
- Касимов Н.С., Самонова О.А., Кошелева Н.Е.* Миграционная способность тяжелых металлов в почвах смешанных лесов // География и окружающая среда. М.: ГЕОС, 2000. С. 415–428.
- Комплексный анализ четвертичных отложений Сатинского учебного полигона / Под ред. Г.И. Рычагова, С.А. Антонова. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1992. 128 с.
- Кузнецов Р.В.* Распределение гумуса и минералов по гранулометрическим фракциям в основных типах почв Ростовской области: Автореф. канд. дисс. Ростов-на-Дону, 2004.
- Ладонин Д.В.* Соединения тяжелых металлов в почвах – проблемы и методы изучения // Почвоведение. 2002. № 6. С. 682–692.
- Минкина Т.М., Пинский Д.Л., Манджиева С.С.* и др. Влияние гранулометрического состава на поглощение меди, свинца и цинка черноземными почвами Ростовской области // Почвоведение. 2011. № 11. С. 1304–1311.
- Панин А.В., Каревская И.А., Фузеина Ю.Н., Шеремецкая Е.Д.* Среднеголоценовая фаза оврагообразования в юго-западном Подмоскovie // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2009. № 6. С. 60–70.
- Пляскина О.В., Ладонин Д.В.* Соединения тяжелых металлов в гранулометрических фракциях некоторых типов почв // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 17. Почвоведение. 2005. № 4. С. 36–43.
- Побединцева И.Г.* Почвы на древних корках выветривания. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1975. 191 с.
- Протасова Н.А.* Редкие и рассеянные элементы (Mn, Cr, V, Ni, Cu, Zn, Co, Mo, Be, Ti, Zr, Ga, Sr, Ba, I, B) в почвообразующих породах Центрального Черноземья // Вестн. ВГУ. Сер. Химия, биология, фармация. 2003. № 2. С. 164–171.
- Самонова О.А., Асеева Е.Н.* Геохимический анализ покровных и моренных суглинков бассейна средней Протвы // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2006а. № 2. С. 43–48.
- Самонова О.А., Асеева Е.Н.* Геохимическая трансформация покровных и моренных суглинков бассейна средней Протвы в процессе почвообразования // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2006б. № 6. С. 67–74.
- Самонова О.А., Асеева Е.Н.* Металлы в почвах эрозионных ландшафтно-геохимических систем (юго-восточная часть Смоленско-Московской возвышенности) // Геохимия ландшафтов и география почв. 100 лет со дня рождения М.А. Глазовской. М.: АПР, 2012. С. 118–142.
- Самонова О.А., Асеева Е.Н.* Почвенно-геохимическая дифференциация малых эрозионных форм в юго-восточной части Смоленско-Московской возвышенности // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2010. № 6. С. 80–88.
- Самонова О.А., Касимов Н.С., Асеева Е.Н.* Подвижные формы металлов в почвах эрозионных ландшафтно-геохимических систем (юго-восточная часть Смоленско-Московской возвышенности) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2011. № 6. С. 67–75.
- Синкевич З.А., Стрижова Г.П.* Содержание меди, цинка, никеля, кобальта и молибдена в гранулометрических фракциях некоторых почв Молдавии // Вопросы исследования и использования почв Молдавии. Вып. 4. Кишинев: Картя Молдовеныска, 1966. С. 68–72.
- Титова Н.А., Травникова Л.С., Кахнович З.Н.* и др. Содержание тяжелых металлов в гранулометрических и денситметрических фракциях почв // Почвоведение. 1996. № 7. С. 888–898.
- Тонконогов В.Д., Градусов Б.П., Рубилина Н.Е.* и др. К дифференциации минералогического и химического составов дерново-подзолистых и подзолистых почв // Почвоведение. 1987. № 3. С. 68–81.
- Шванов В.Н.* Петрография песчаных пород (компонентный состав, систематика и описание минеральных видов). Л.: Недра, 1987. 269 с.
- Acosta J.A., Martínez-Martínez S., Faz A., Arocena J.* Accumulations of major and trace elements in particle size fractions of soils on eight different parent materials // Geoderma. 2011. Vol. 161, N 1. P. 30–42.
- Anda M., Chittleborough D.J., Fitzpatrick R.W.* Assessing parent material uniformity of a red and black soil complex in the landscapes // Catena. 2009. Vol. 78, N 2. P. 142–153.

Berrow M.L., Mitchell R.L. Location of trace elements in soil profiles: total contents of particle-size separates // *Trans. R. Soc. Edinb. Earth scie.* 1991. Vol. 82, N 3. P. 195–209.

Burt R., Wilson M.A., Mays M.D., Lee C.W. Major and trace elements of selected pedons in the USA // *J. Environ. Qual.* 2003. Vol. 32. P. 2109–2121.

Förstner U. Chemical forms of metal accumulation in recent sediments // *Ore genesis.* Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 1982. P. 191–199.

Hardy M., Cornu S. Location of natural trace elements in silty soils using particle-size fractionation // *Geoderma.* 2006. Vol. 133, N 3–4. P. 295–308.

Huang B., Li Z., Huang J. et al. Adsorption characteristics of Cu and Zn onto various size fractions of aggregates from red paddy soil // *J. Hazardous Mat.* 2014. Vol. 264. P. 176–183.

Marshall P., Fairbridge R.W. Encyclopedia of geochemistry. Kluwer Academic Publish., 1999. 1821 p.

Panin A.V., Fuzeina J.N., Belyaev V.R. Long-term development of Holocene and Pleistocene gullies in the Protva River basin, Central Russia // *Geomorphology.* 2009. Vol. 108. P. 71–91.

Samonova O. A., Aseyeva E.N., Kasimov N.S. Metals in soils of erosional systems in forest zone in the central part of European Russia // *J. Geochem. Explor.* 2014. Vol. 144. P. 247–259.

Поступила в редакцию 05.11.2015

Принята к публикации 16.03.2016

O.A. Samonova¹, N.S. Kasimov², E.N. Aseyeva³

GRAIN SIZE DISTRIBUTION OF METALS IN SOILS OF A GULLY SYSTEM (SOUTHEASTERN SMOLENSK-MOSCOW UPLAND)

The lateral distribution of Fe, Mn, Ti, Zr, Ni, Co, Cr, Zn, Pb in 1–0,25, 0,25–0,05, 0,05–0,01, 0,01–0,001 and <0,001 mm grain-size fractions of humus soil horizons was studied in a gully system located in the central Protva River basin (forest zone). The metals tend to accumulate in certain grain-size fractions: Ti – in all silt fractions; Zr – in the coarse silt fraction; Zn and Pb – in the fractions finer than 0,01 mm. Clay fraction is enriched in Mn, Co, Ni, Cr, Fe; second maximum of these metals is restricted to the coarse-grained and medium-grained sand. The particle size defines the variability of metal contents and their lateral distribution across the gully catchment area, its slopes, bottom and fan. A relatively uniform distribution of metals is found in clays, as well as in medium- and fine-grained silt, while sand fractions show a clearly uneven distribution of elements. Lateral patterns of metal distributions are dependent on different factors including the origin of soil particles (sand fraction) and the changes occurring during their migration (sand, silt, and clay fractions).

Keywords: metals, humus soil horizon, grain-size fractions, physical migration, lateral distribution.

Acknowledgements: The study was financially supported by the Russian Science Foundation (project N 14-27-00083).

REFERENCES

Acosta J.A., Martínez-Martínez S., Faz A., Arocena J. Accumulations of major and trace elements in particle size fractions of soils on eight different parent materials // *Geoderma.* 2011. Vol. 161, N 1. P. 30–42.

Anda M., Chittleborough D.J., Fitzpatrick R.W. Assessing parent material uniformity of a red and black soil complex in the landscapes // *Catena.* 2009. Vol. 78, N 2. P. 142–153

Azhigirov A.A., Golosov V.N., Dobrovol'skaja N.G. et al. Issledovanie stoka vody i nanosov na sklonovykh vodosborakh v bassejne r. Protvy [A study of water and sediment flow on slope catchments in the Protva river basin], Moscow, VINITI, 1987, no 6389-V87, 175 p. (in Russian).

Berrow M.L., Mitchell R.L. Location of trace elements in soil profiles: total contents of particle-size separates // *Trans. R. Soc. Edinb. Earth scie.* 1991. Vol. 82, N 3. P. 195–209.

Burt R., Wilson M.A., Mays M.D., Lee C.W. Major and trace elements of selected pedons in the USA // *J. Environ. Qual.* 2003. Vol. 32. P. 2109–2121.

Dmitriev E.A. Matematicheskaja statistika v pochvovedenii [Mathematical statistics in soil science], Moscow, Izd-vo Mosk. un-ta, 1995, 320 p. (in Russian).

Dobrovol'skij V.V. Geografija mikrojelementov. Global'noe rassejanie [Geography of trace elements. Global dispersion], Moscow, Mysl', 1983, 272 p. (in Russian).

Förstner U. Chemical forms of metal accumulation in recent sediments // *Ore genesis.* Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 1982. P. 191–199.

Hardy M., Cornu S. Location of natural trace elements in silty soils using particle-size fractionation // *Geoderma.* 2006. Vol. 133, N 3–4. P. 295–308

Huang B., Li Z., Huang J. et al. Adsorption characteristics of Cu and Zn onto various size fractions of aggregates from red paddy soil // *J. Hazardous Mat.* 2014. Vol. 264. P. 176–183.

Gennadiev A.N., Golosov V.N., Markelov M.V. et al. Razrabotka metoda raznovozrastnykh trasserov dlja ocenki stadijnosti pochvenno-jerozionnykh processov [The development of a method of different-age tracers to evaluate soil erosion stages]. *Vestnik Moskovskogo universiteta, serija 5, Geografija*, 2008, no 3, pp. 24–31 (in Russian).

Gerasimova M.I., Isachenkova L.B. Pochvy i pochvennyj pokrov Satinskogo uchebnogo poligona [Soil and soil cover of the Satino training station], Moscow, Izd-vo Mosk. un-ta, 2003, 39 p. (in Russian).

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Landscape Geochemistry and Soil Geography, Leading Research Scientist, Associate Professor, PhD in Geography; *e-mail:* oasamonova@mail.ru

² Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography Department of Landscape Geochemistry and Soil Geography, Head of the Department, Faculty President, Academician RAS, D.Sc. in Geography; *e-mail:* secretary@geogr.msu.ru

³ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Landscape Geochemistry and Soil Geography, Senior Research Scientist, PhD in Geography; *e-mail:* aseyeva@mail.ru

Golosov V.N. Jerozionno-akkumulativnye processy v rechnyh bassejnah osvoennyh ravnin [The erosional and accumulative processes in river basins in cultivated plains], Moscow, GEOS, 2006, 296 p. (in Russian).

Kasimov N.S., Samonova O.A., Kosheleva N.E. Migracionnaja sposobnost' tjazhelyh metallov v pochvah smeshannyh lesov [The migration ability of heavy metals in soils of mixed forests], Geografija i okruzhajushhaja sreda, Moscow, GEOS, 2000, pp. 415–428 (in Russian).

Kompleksnyj analiz chetvertichnyh otlozhenij Satinskogo uchebnogo poligona [The integrated analysis of the Quaternary deposits of the Satino training station], Eds. G.I. Rychagov, S.A. Antonov, Moscow, Izd-vo Mosk. un-ta, 1992, 128 p. (in Russian).

Kuznecov R.V. Raspreделение gumusa i mineralov po granulometricheskimi frakcijam v osnovnyh tipah pochv Rostovskoj oblasti [The distribution of humus and minerals across particle size fractions in the main types of soils of the Rostov region], PhD thesis, Rostov-na-Donu, 2004 (in Russian).

Ladonin D.V. Soedinenija tjazhelyh metallov v pochvah – problemy i metody izuchenija [The compounds of heavy metals in soil – the problems and methods of study], Pochvovedenie, 2002, no 6, pp. 682–692 (in Russian).

Marshall P., Fairbridge R.W. Encyclopedia of geochemistry. Kluwer Academic Publish., 1999. 1821 p.

Minkina T.M., Pinskiy D.L., Mandzhieva S.S. et al. Vlijanie granulometricheskogo sostava na pogloshhenie medi, svinca i cinka chernozemnymi pochvami Rostovskoj oblasti [The impact of particle size distribution on the copper, lead and zinc absorption in chernozemic soils of the Rostov region], Pochvovedenie, 2011, no 11, pp. 1304–1311 (in Russian).

Panin A.V., Fuzeina J.N., Belyaev V.R. Long-term development of Holocene and Pleistocene gullies in the Protva River basin, Central Russia // Geomorphology. 2009. Vol. 108. P. 71–91.

Panin A.V., Karevskaja I.A., Fuzeina Ju.N., Sheremeckaja E.D. Srednegolocenovaja faza ovragoobrazovaniya v jugo-zapadnom Podmoskov'e [The middle Holocene stage of ravine formation in the south-western part of the Moscow region], Vestnik Moskovskogo universiteta, serija 5, Geografija, 2009, no 6, pp. 60–70 (in Russian).

Pljaskina O.V., Ladonin D.V. Soedinenija tjazhelyh metallov v granulometricheskimi frakcijah nekotoryh tipov pochv [Compounds of heavy metals in certain types of granulometric fractions of soil], Vestnik Moskovskogo universiteta, serija 17, Pochvovedenie, 2005, no 4, pp. 36–43 (in Russian).

Pobedinceva I.G. Pochvy na drevnih korah vyvetrivanija [The soils on ancient weathering crusts], Moscow, Izd-vo Mosk. un-ta, 1975, 191 p. (in Russian).

Protasova N.A. Redkie i rassejannye jelementy (Mn, Cr, V, Ni, Cu, Zn, Co, Mo, Be, Ti, Zr, Ga, Sr, Ba, I, B) v pochvoobrazujushhijh porodah Central'nogo Chernozem'ja [Rare and trace elements (Mn, Cr, V, Ni, Cu, Zn, Co, Mo, Be, Ti, Zr, Ga, Sr, Ba, I, B) in the parent materials of the Central Chernozemic Belt region], Vestnik VGU, serija Himija, biologija, farmacija, 2003, no 2, pp. 164–171 (in Russian).

Samonova O.A., Aseeva E.N. Geohimicheskij analiz pokrovyh i morenyh suglinkov bassejna Srednej Protvy

[Geochemical analysis of mantle and moraine loams of the Central Protva river basin], Vestnik Moskovskogo universiteta, serija 5, Geografija, 2006a, no 2, pp. 43–48 (in Russian).

Samonova O.A., Aseeva E.N. Geohimicheskaja transformacija pokrovyh i morenyh suglinkov bassejna Srednej Protvy v processe pochvoobrazovaniya [Geochemical transformation of mantle and moraine loams as a result of soil formation in the Central Protva river basin], Vestnik Moskovskogo universiteta, serija 5, Geografija, 2006b, no 6, pp. 67–74 (in Russian).

Samonova O.A., Aseeva E.N. Metally v pochvah jerozionnyh landshaftno-geohimicheskimi sistem (jugo-vostochnaja chast' Smolensko-Moskovskoj vozvyshehnosti) [Metals in soil erosion landscape-geochemical systems (south-eastern part of Smolensk-Moscow Upland)], Geohimija landshaftov i geografija pochv. 100 let so dnja rozhdenija M.A. Glazovskoj, Moscow, APR, 2012, pp. 118–142 (in Russian).

Samonova O.A., Aseeva E.N. Pochvenno-geohimicheskaja differenciacija malyh jerozionnyh form v jugo-vostochnoj chasti Smolensko-Moskovskoj vozvyshehnosti [Soil-geochemical differentiation of small erosional landforms in the south-eastern part of Smolensk-Moscow Upland], Vestnik Moskovskogo universiteta, serija 5, Geografija, 2010, no 6, pp. 80–88 (in Russian).

Samonova O.A., Aseeva E.N., Kasimov N.S. Metals in soils of erosional systems in forest zone in the central part of European Russia // J. Geochem. Explor. 2014. Vol. 144. P. 247–259.

Samonova O.A., Kasimov N.S., Aseeva E.N. Podvizhnye formy metallov v pochvah jerozionnyh landshaftno-geohimicheskimi sistem (jugo-vostochnaja chast' Smolensko-Moskovskoj vozvyshehnosti) [Metals' mobile forms in soils of erosional landscape-geochemical systems (south-eastern part of Smolensk-Moscow Upland)], Vestnik Moskovskogo universiteta, serija 5, Geografija, 2011, no 6, pp. 67–75 (in Russian).

Shvanov V.N. Petrografija peschanyh porod (komponentnyj sostav, sistematika i opisanie mineral'nyh vidov) [Petrography of sandy rocks (the component composition, taxonomy and description of mineral species)], Leningrad, Nedra, 1987, 269 p. (in Russian).

Sinkevich Z.A., Strizhova G.P. Soderzhanie medi, cinka, nikelja, kobal'ta i molibdena v granulometricheskimi frakcijah nekotoryh pochv Moldavii [The content of copper, zinc, nickel, cobalt and molybdenum in several granulometric fractions of soil Moldova], Voprosy issledovanija i ispol'zovanija pochv Moldavii, Kishinev, Kartya Moldovenyaska, 1966, no 4, pp. 68–72 (in Russian).

Titova N.A., Travnikova L.S., Kahnovich Z.N. et al. Soderzhanie tjazhelyh metallov v granulometricheskimi i densimetricheskimi frakcijah pochv [The content of heavy metals in soil grain size fractions], Pochvovedenie, 1996, no 7, pp. 888–898 (in Russian).

Tonkonogov V.D., Gradusov B.P., Rubilina N.E. et al. K differenciacii mineralogicheskogo i himicheskogo sostavov dernovo-podzolistykh i podzolistykh pochv [About the differentiation of mineralogical and chemical composition of sod-podzolic and podzolic soils], Pochvovedenie, 1987, no 3, pp. 68–81 (in Russian).

Varshal G.I., Veljuhanova T.K., Koshheeva I.Ja. Geohimicheskaja rol' guminovyh kislot v migracii jelementov [Geochemical role of humic acids in the migration of elements], Guminovye veshhestva v biosfere. Moscow, Nauka, 1993, pp. 97–117 (in Russian).

Received 05.11.2015

Accepted 16.03.2016

УДК 550.424.4; 631.416.9

И.Н. Семенков¹, Н.С. Касимов², Е.В. Терская³

ЛАТЕРАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ФОРМ МЕТАЛЛОВ В ТУНДРОВЫХ, ТАЕЖНЫХ И ЛЕСОСТЕПНЫХ КАТЕНАХ ВОСТОЧНО-ЕВРОПЕЙСКОЙ РАВНИНЫ

Для оценки миграции металлов изучено латеральное распределение обменных, органоинеральных, специфически сорбированных гидроксидами Fe и Mn форм металлов, и валового содержания Fe, Mn, Co, Cr, Cu, Ni, Pb, Sr и Zn в модельных суглинистых катенах на юге Большеземельской тундры, юго-западе Мезенско-Вычегодской равнины и Плавском плато. Установлено, что в почвах понижено валовое содержание Fe, Sr и Mn при околосларковых уровнях остальных металлов; в ряду тундровых – таежных – лесостепных катен уменьшается валовое содержание Pb, обменных соединений Fe, Cu, Zn и специфически сорбированного Fe и, наоборот, увеличивается валовое содержание Fe, Ni, Zn, Cu, Mn, органоинеральных Pb, Ni, Co, Zn. Сделан вывод, что контрастность латерального распределения форм металлов уменьшается от тундровых к таежным и лесостепным катенам.

Ключевые слова: катена, водосбор, латеральное распределение, подвижность металлов, глеезем, криометаморфическая почва, дерново-подзолистая почва, чернозем, Восточно-Европейская равнина.

Введение. Одним из первых на важность исследования гипергенных процессов как удобной модели для оценки миграции веществ в геологическом круговороте обратил внимание А.И. Перельман. Особенно значителен его вклад в разработку учения о водной миграции элементов в ландшафтах, отражением которой является радиальная и латеральная структура геохимических катен – совокупность сопряженных в рельефе элементарных ландшафтов. Повышенное внимание в своих работах он уделял изучению поведения Br, Cu, Cr, Fe, Mn, Mo, Se, Sr и особенно U, отмечая важность оценки миграционной способности элементов в разных геохимических обстановках. Новаторские идеи А.И. Перельмана реализовались в представлениях о геохимических барьерах, классах водной миграции, типоморфных элементах, созданной им первой ландшафтно-геохимической карте России и географогенетической классификации катен. В этих трудах синтезированы результаты ландшафтно-геохимических исследований в XX в.

Водосборы балок как геохимические микроарены, играющие важную роль в перемещении вещества, – традиционные модельные объекты для оценки радиальной и латеральной структуры геохимических ландшафтов. Достаточно полно изучена их дифференциация по валовому содержанию металлов. Распределение подвижных форм, извлекаемых из почв вытяжками нейтральных солей или слабых кислот, в качестве более чуткого показателя, реагирующего на изменения физико-химических условий, исследовано не так детально. В суглинистых

катенах с подзолистыми почвами и глееземами изучены соединения металлов, извлекаемые вытяжками Тамма и Мера–Джексона: соединения Mn, Ni и Co – на Валдайской возвышенности [Никифорова, 1979]; Fe – в междуречье рек Вычегда и Вятка [Канев, 2011]. Обменные, органоинеральные и специфически сорбированные гидроксидами Fe и Mn соединения металлов в катенах фоновых ландшафтов изучали в лесостепи Приволжской [Касимов и др., 1992] и Среднерусской возвышенностей [Щеглов и др., 2013; Семенков и др., 2013, 2015a]. Для других регионов есть данные только о латеральном распределении валового содержания элементов.

Цель работы – изучение почвенно-геохимической структуры балочных катен на суглинистых отложениях в качестве моделей для оценки миграции металлов в фоновых ландшафтах тундры, тайги и лесостепи Восточно-Европейской равнины.

На равнинах, как правило, модельными объектами для изучения почвенно-геохимической структуры служат ландшафты на лёссовидных суглинках с зональным типом растительности и почв. Для исследования в качестве модельных объектов выбраны монолитные (с однородными почвообразующими породами) суглинистые микроарены с максимальной для конкретной ландшафтной зоны контрастностью условий миграции в катенах [Семенков и др., 2015б]. В тундрах на Восточно-Европейской равнине они представлены сопряжением междуречных глееземов, склоновых криометаморфических почв и глееземов подчиненных ландшафтов, в тайге – подзолистыми остаточными карбонатными почва-

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра геохимии ландшафтов и географии почв, мл. науч. с.; *e-mail:* semenkov@igem.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, заведующий кафедрой геохимии ландшафтов и географии почв, профессор, академик РАН; *e-mail:* secretary@geogr.msu.ru

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра геохимии ландшафтов и географии почв, науч. с.; *e-mail:* elena_terskaya@mail.ru

ми и глееземами, в лесостепи – черноземами и лугово-черноземными почвами. В связи с этим в тундре и лесостепи выбраны микроарены на лёссовидных суглинках, в тайге – на карбонатных моренных суглинках, так как подзолистые почвы на них контрастнее по величине pH и текстурной дифференциации, чем на подзолистых почвах на лёссовидных суглинках [Тонконогов, 2010].

Материалы и методы исследований. Исследованы фоновые катены трех типичных микроарен с уклонами бортов 4–5° в тундровых и таежных ландшафтах и 7–10° – в лесостепных (рис. 1).

Тундровые катены на лёссовидных суглинках изучены на водосборе площадью 0,25 га в междуречье рек Уса и Кара в 30 км на юг от г. Воркута. Междуречье занято ерником зеленомошно-бело-мошным на маломощных (до 30 см) мерзлотных глееземах (тундрово-глеевых почвах). На склонах и в днище балки под ерником зеленомошно-бело-мошным и зеленомошным из-за увеличения глубины протаивания формируются криометаморфические почвы (разрезы 7, 8, 10 и 11) и криометаморфизованные глееземы [Буданцева и др., 2015].

частях склонов под ельником с примесью сосны и осины, разнотравным или кисличным развиты дерново-подзолистые остаточно-карбонатные почвы (разрезы 1 и 9), в том числе с вложенным субпрофилем подзола (разрезы 2 и 5). В воронке сбора талых вод под таволжатником дерново-подзолистые глееватые остаточно-карбонатные почвы отличаются от склоновых сизовой окраской горизонта BTg (разрезы 4 и 8). В днище балки под еловым с примесью березы смородиново-разнотравно-зелено-мошным лесом сформировались глееземы (разрезы 3 и 16).

Лесостепные катены с агроландшафтами Плавского плато изучены на водосборе площадью 80 га на левобережье р. Плага – левого притока Упы, в 70 км на юг от г. Тула. На междуречье и склонах развиты агрочерноземы глинисто-иллювиальные (выщелоченные и оподзоленные черноземы) на лёссовидных суглинках. Верхняя часть днища балки со стратоземами (лугово-черноземными почвами) распаханна (разрез 6), в средней и нижней – покрыта злаково-разнотравным лугом (разрезы 7 и 8) [Семенов и др., 2015a].

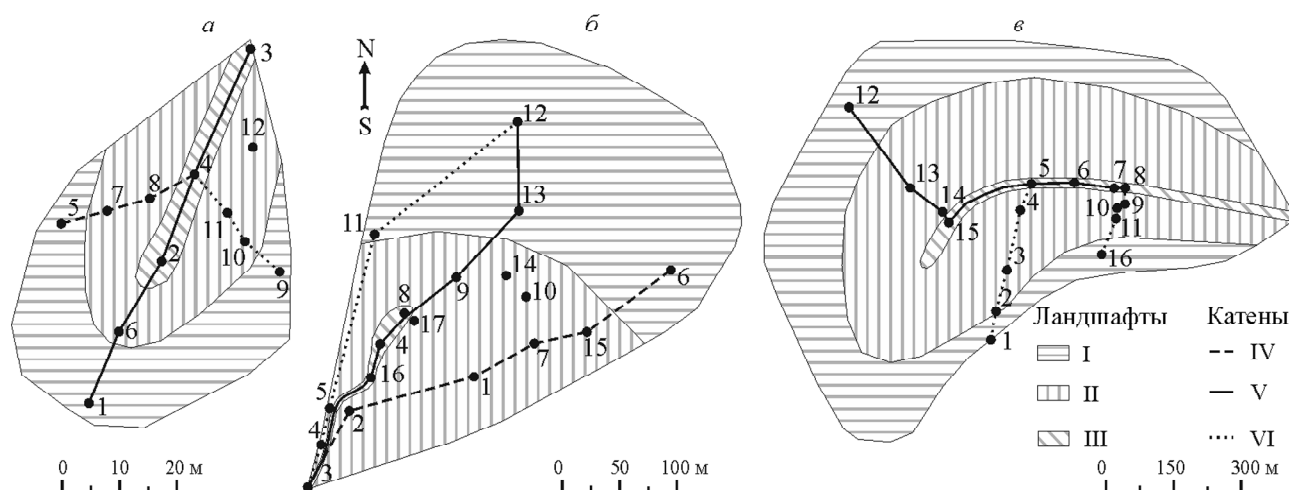


Рис. 1. Модельные микроарены (а – тундровая, б – таежная, в – лесостепная): 1–17 – места заложения разрезов. Элементарные ландшафты: I – автономный выровненной поверхности междуречья, II – трансэлювиальный склонов, III – трансэлювиально-аккумулятивный днищ балок; катены: IV – правая, V – центральная, VI – левая

Fig. 1. Model microareas (a – tundra, b – taiga, c – forest steppe): 1–17 – site locations of sections. Elementary landscapes: I – autonomous flat watershed surface; II – transeluvial slope; III – transeluvial-accumulative ravine bottoms. Catenae: IV – right, V – central, VI – left

Таежные катены на моренных карбонатных суглинках исследованы в юго-западной части Мезенско-Вычегодской равнины на водосборе площадью 8,7 га (Ляльский стационар Института биологии Коми СО РАН, в 70 км на север от г. Сыктывкар). На междуречье под елово-пихтовым можжевельником злаково-разнотравно-зеленомошным лесом формируются подзолистые остаточно-карбонатные почвы (разрезы 6, 7, 12, рис. 1, б). Верхняя часть слабопокатых склонов занята молодым березово-ивовым мертвopoкpoвным лесом с подростом ели и сосны, чередующимся с участками разнотравно-злакового луга, на дерново-подзолистых остаточно-карбонатных почвах (разрезы 7, 10, 11, 13–15, рис. 1, б). В средней и нижней

В балках изучали продольную катену вдоль днища и две поперечные катены от правого и левого бортов. Всего заложено 32 почвенных разрезов, 13 точек поверхностного опробования, отобрано 176 проб почв, в том числе 60 из гумусового горизонта. Латеральная почвенно-геохимическая структура катен оценена по гумусовым горизонтам, наиболее ярко отражающим результат взаимодействия биоты с минеральным веществом почв, а также характер поверхностного стока химических элементов.

Химико-аналитические исследования выполнены в Эколого-геохимическом центре географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова. Содержание гумуса и величина pH водной суспензии

определены по [Аринушкина, 1962], гранулометрический состав – дифрактометрическим методом; валовое содержание металлов – рентген-флуоресцентным методом, содержание металлов в вытяжках – атомно-абсорбционным методом. Непрочно связанные соединения Fe, Mn, Pb, Co, Ni, Zn, Cu, Sr и Sr экстрагировали в течение 18 ч тремя параллельными вытяжками: 1н HNO_3 (соотношение почва : раствор = 1:10), ацетатно-аммонийным буфером с pH 4,8 (1:5) и его раствором с 1%-ной этилендиаминтетрауксусной кислотой (ЭДТА) (1:5). Обменные соединения металлов извлекали ацетатно-аммонийным буфером. Количество органоминеральных соединений рассчитывали по разнице между концентрацией элементов в вытяжке ацетатно-аммонийного буфера с ЭДТА и чистым буфером; специфически сорбированные гидроксидами Fe и Mn формы – по разнице содержания в азотнокислой и ацетатно-аммонийной вытяжках [Минкина и др., 2009]. Количество прочно связанных соединений (силикатные соединения, или остаточная фракция) рассчитывали по разнице между валовым содержанием металла и содержанием трех подвижных форм.

Валовое содержание металлов в почвах сравнивали с кларковыми уровнями. Кларк концентрации (КК) – отношение содержания металла в почве к его содержанию в литосфере по А.П. Виноградову [1962], кларк рассеяния (КР) – величина, обратная КК. Характер латерального распределения металлов и его контрастность в гумусовых горизонтах почв катен оценивали с помощью коэффициента латеральной дифференциации (L) – отношения содержания в почвах подчиненных ландшафтов к содержанию в почвах автономных позиций. Связь между распределением металлов и физико-химическими свойствами считали значимой по значениям коэффициента линейной корреляции r с уровнем значимости $>0,95$.

Результаты исследований и их обсуждение.

Уровень содержания металлов. Содержание металлов в гумусовом горизонте почв катен соответствует или меньше кларка литосферы (таблица, рис. 2). Кислые глеевые почвы Большеземельской тундры на лёссовидных суглинках наиболее обеднены металлами: ($\text{KР}_{\text{Fe}}=1,9$; $\text{KР}_{\text{Sr}}=2,2$; $\text{KР}_{\text{Mn}}=6,1$). Содержание подвижных форм металлов соответствует фоновым значениям [Ковда и др., 1959; Микроэлементы..., 1981б; Geochemical..., 2005; Kabata-Pendias, 2011; Reimann et al., 2014]. Геохимические спектры подзолистых почв и глееземов таежных катен Мезенско-Вычегодской равнины, а также черноземов и лугово-черноземных почв лесостепных катен Плавского плато отличаются мало. Глееземы и криометаморфические почвы катен Большеземельской тундры содержат больше Pb, Sr и меньше Mn, Ni, Co при близком уровне содержания Fe, Cr, Cu, Zn (рис. 2).

Содержание подвижных форм металлов варьирует в гумусовом горизонте почв каждой микроаре-

ны на уровне 20–80%, типичном для почв Восточно-Европейской равнины [Микроэлементы..., 1973]. Значения коэффициента вариации $>100\%$ свойственны преимущественно соединениям металлов с содержанием в почвах, близким к порогу чувствительности метода. В тундровых глееземах и криометаморфических почвах они характерны⁴ для обменного Zn_{272} , органоминеральных Cu_{105} , Ni_{124} , Pb_{221} , Fe_{546} , Mn_{664} , Zn_{6471} , специфически сорбированного Mn_{327} . В подзолистых, дерново-подзолистых почвах и глееземах высокая вариабельность выявлена для обменных Cu_{1637} , Zn_{151} , органоминеральных Ni_{415} , Zn_{100} и специфически сорбированных Ni_{199} . В лесостепных черноземах она повышена только у специфически сорбированного Cr_{120} . Вариабельность содержания металлов в силикатной форме меньше, чем в обменной, органоминеральной или специфически сорбированной для Fe, Sr, Cr, Cu, Zn и находится на одном уровне для Mn, Co, Ni и Pb, т.е. чем больше доля силикатных соединений от валового содержания, тем меньше вариабельность ее содержания [Самсонова, 2008; Семенов и др., 2013].

В ряду тундровые глееземы–таежные подзолистые–лесостепные черноземы уменьшается содержание валового Pb₁₇ и увеличивается содержание валовых Fe_{1,2}, Ni_{1,3}, Zn_{1,4}, Cu_{1,6}, Mn_{3,5}. Для Cu, Ni, Zn такая же закономерность установлена в зональном ряду почв Восточно-Европейской равнины [Ковда и др., 1959; Микроэлементы..., 1973]. Содержание Mn, несмотря на его высокую биофильность, зависит преимущественно от состава почвообразующих пород [Микроэлементы..., 1973]. От почв тундро-

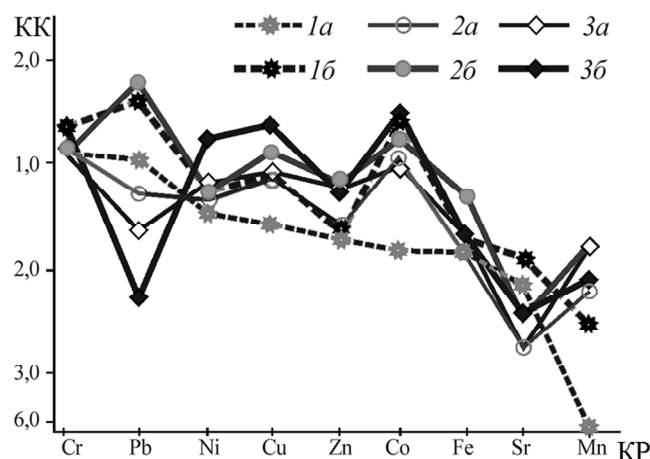


Рис. 2. Геохимические спектры гумусовых горизонтов (а) и почвообразующих пород (б): 1 – тундровая (6 проб в гумусовом горизонте, 7 проб в почвообразующей породе), 2 – таежная (23/10), 3 – лесостепная (31/3) микроарены. Кларки концентрации (КК) и рассеяния (КР) относительно литосферы, по [Виноградов, 1962]

Fig. 2. Geochemical spectra of humus horizons (a) and soil-forming rocks (b): 1 – tundra microarena (6 samples from humus horizon, 7 samples from soil-forming rocks); 2 – taiga microarena (23/10); 3 – forest steppe microarena (31/3). Clarks of concentrations (CC) and dispersal (CD) relative to the lithosphere [Vinogradov, 1962]

⁴ В подстрочных индексах указаны значения коэффициента вариации, %.

Содержание гранулометрических фракций, гумуса (%), металлов (мг/кг) и величина pH в гумусовых горизонтах почв автономных ландшафтов микроарен

Катены		Фракция						pH	Co					Cr					Cu					Fe					
									C _{орг}																				
		I	II	III	IV	V	VI			1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Тундровые	п(1)	0,1	15	56	12	13	3,9	4,4	0,4	0	0,1	9	9,5	1,2	–	2,2	94	98	0,6	2,2	2,7	24	30	608	9	0,57	1,6	2,2	
	ц(1)	1,6	19	55	12	11	2,4	6,8	0,4	0	0,1	5	5,5	1	–	1,1	87	89	1,2	1,8	4,9	13	21	718	15	0,87	1,5	2,5	
	л(1)	1,1	11	51	12	19	7,1	0,4	0,7	0,4	0,4	22	24	0,5	–	1,2	92	93	2,2	3,2	2,8	35	43	307	226	0,33	2,3	2,6	
Таежные	п(3)	29	32	22	6,8	8,4	1,8	4,9	3,1	0,3	0,9	1,7	13	18	1	–	2,2	87	90	0,14	0,9	2,4	34	44	83	1364	0,42	1,9	2,4
	ц(3)	29	28	23	7,7	10	2,4	4,5	1,4	0,3	0,6	1,6	15	18	1,3	–	2,8	87	90	0,4	3,5	2,8	31	44	186	1364	0,44	1,9	2,4
	л(1)	29	32	22	6,8	8,4	1,8	4	3,1	0,3	0,9	1,7	13	18	1	–	2,2	87	90	0,1	0,9	2,4	34	44	83	1364	0,43	1,9	2,4
Лесо-степные	п ₁ (2)	–	1,2	53	15	25	5,8	5,8	3,6	0,1	2,2	1,9	16	19	0,2	0,1	0,8	85	85	0,1	2,4	3,8	37	42	1,8	295	0,05	2,8	2,9
	ц(3)	–	0,2	53	16	25	5,7	5,5	2,6	0,1	2,9	1,1	14	19	0,2	0,1	0,5	91	92	0,1	2,6	3,5	40	46	1,5	357	0,05	2,8	3
	п ₂ (1)	2,2	2	54	14	22	5,3	5,5	3,4	0,1	1,7	2,3	14	18	0,1	0,4	0,7	84	85	0,1	2,7	2,9	38	44	1,2	337	0,05	2,8	2,9
Катены		Mn						Ni					Pb					Sr					Zn						
		1	2	3	4	5		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5		
Тундровые	п(1)	9,6	0	7,3	134	150	0,2	0,1	0,1	0,1	39	39	0,6	0	2	14	17	0,7	–	–	–	169	170	0,27	0	2,8	46	49	
	ц(1)	4,5	0,4	1,1	113	120	0,2	0,1	0,1	0,1	40	40	0,6	0	1,9	8,6	11	–	–	–	–	142	142	0,24	1,1	2	46	49	
	л(1)	59	45	119	122	345	0,8	0	–	–	48	49	0,6	0,6	2	24	27	0,5	0,3	–	–	188	186	0,7	–	6,5	45	52	
Таежные	п(3)	43	190	113	216	575	0,2	–	1	43	45	0,59	1,2	1,4	6,4	11	11	9,9	–	–	–	114	124	0,16	1,5	8,9	51	60	
	ц(3)	10	140	60	141	347	0,3	–	0,8	44	45	0,7	1	3,2	6,4	12	12	9,9	–	–	–	114	127	0,16	0,6	4,7	49	57	
	л1	43	190	113	216	575	0,2	–	1	44	45	0,6	1,2	1,4	6,4	12	12	9,9	–	–	–	114	124	0,16	1,5	8,9	51	60	
Лесо-степные	п ₁ (2)	13	191	128	275	588	0,1	4,1	6,1	6,1	44	52	0,5	2,1	0,8	8,8	8,1	9	–	–	3,7	116	128	0,12	1,1	3,6	61	68	
	ц(3)	18	235	127	201	560	0,2	3,9	5,8	5,8	42	52	0,2	3,4	0,9	5,1	10	9,7	–	–	2,6	121	131	0,01	1,2	5,1	72	76	
	п ₂ (1)	12	196	176	209	592	0,2	3,7	5,4	5,4	41	50	0,2	3,8	1,1	5,9	11	7,8	–	–	4,9	116	126	0,01	3,5	3,3	64	71	

Примечания. Катены: л – левая, п – правая, ц – центральная, в скобках – число проб. Форма металлов: 1 – обменная, 2 – органоминеральная, 3 – сорбированная гидроксидами Fe и Mn, 4 – силикатная, 5 – валовое содержание. Прочерк – содержание ниже предела обнаружения. Гранулометрические фракции: I – крупнопесчаная и среднепесчаная, II – мелкопесчаная, III – крупнопылеватая, IV – среднепылеватая, V – мелкопылеватая, VI – илистая. Полуторным выделены значения, отличающиеся более чем в 1,5 раза от среднего содержания по микроарене; * в %.

вых катен к таежным и лесостепным уменьшается содержание обменных Fe_{610} , Zn_{11} , Cu_9 , специфически сорбированного Fe_{19} , что отражает уменьшение их подвижности при смене в этих почвах глеевой среды кислородной. Содержание органоминерального Pb увеличивается в 4 раза, Co и Ni – в 15 и 26 раз, Zn – в 330 раз соответственно, специфически сорбированных Mn и Ni – в 27 и 30 раз, что отражает аккумуляцию на биогеохимическом барьере в гумусовых горизонтах.

Тундровые катены. В гранулометрическом составе легкосуглинистых глееземов и криометаморфических почв катен на юго-западе Большеземельской тундры доминирует крупная пыль (рис. 3, а). Почвы очень кислые: pH составляет $3,7 \pm 0,3$ ($n=13$) в горизонте BHF и достоверно не отличается в раз-

ных ландшафтах, равномерно распределяясь в междуречных и склоновых глееземах с минимумом в верхней части криометаморфических почв. Содержание $C_{орг}$ уменьшается с глубиной с $25 \pm 4\%$ ($n=13$) в подстильно-торфяном горизонте O до $4,4 \pm 2,7\%$ ($n=5$) в горизонте BHF и до $0,3\%$ ($n=32$) в горизонтах G, CRM и в мерзлоте.

В тундровой микроарене глееземы и криометаморфические почвы подчиненных ландшафтов обеднены песчаной фракцией ($L=0,1 \div 0,5$); склоновые криометаморфические почвы содержат больше ила и меньше гумуса ($L=1,6$ и $0,6$ соответственно).

В горизонте BHF глеезема автономного ландшафта катены правого борта балки содержится больше крупного и среднего песка относительно среднего по микроарене, а также несколько увели-

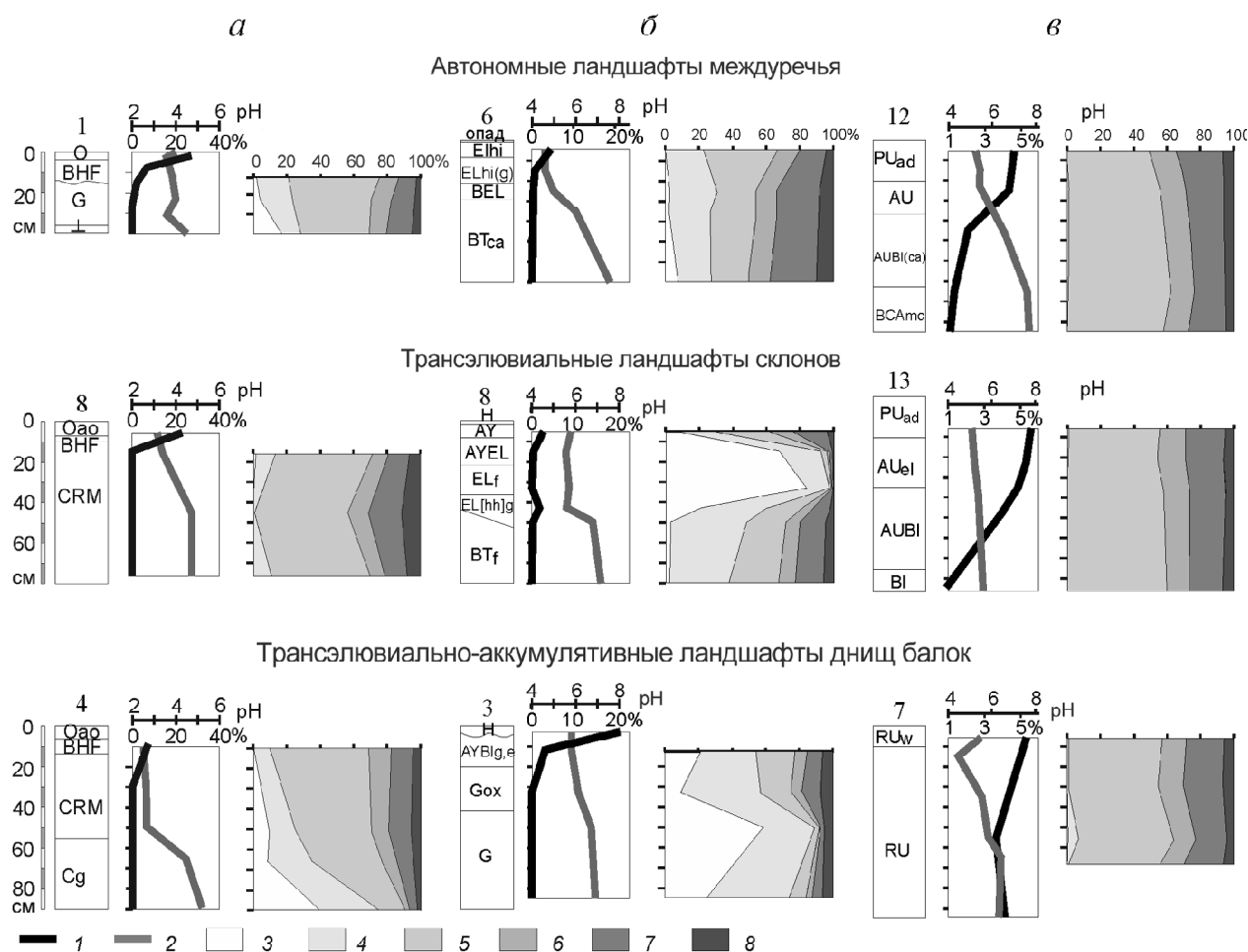


Рис. 3. Радиальное распределение величины pH (1), содержания гумуса (2) и гранулометрических фракций (3 – крупный и средний песок, 4 – мелкий песок, 5 – крупная пыль, 6 – средняя пыль, 7 – мелкая пыль, 8 – ил) в почвах; а – тундровая микроарена: глеезем криотурбированный (разрез 1), криометаморфическая грубогумусированная глееватая почва (разрез 4), криометаморфическая грубогумусовая почва (разрез 8); б – таежная микроарена: глеезем перегнойно-окисленно-глеевый (разрез 3), подзолистая поверхностно-глееватая остаточно-карбонатная почва (разрез 6), дерново-подзолистая со вторым гумусовым горизонтом остаточно-карбонатная почва (разрез 8); в – лесостепная микроарена: стратозем темногумусовый (разрез 7), агрочернозем глинисто-иллювиальный типичный (разрез 12), агрочернозем глинисто-иллювиальный (разрез 13). Названия горизонтов почв даны по [Классификация..., 2004]

Fig. 3. Radial distribution of pH (1), humus content (2) and granulometric fractions (3 – coarse and medium sand, 4 – fine sand, 5 – coarse silt, 6 – medium silt, 7 – fine silt, 8 – mud) in soils; а – tundra microarena: cryoturbated gley soil (section 1), cryometamorphic humified gley soil (section 4), cryometamorphic humified soil (section 8); б – taiga microarena: gley soil humified-oxidized (section 3), podzolic surface-gley residual carbonate soil (section 6), sod-podzolic residual carbonate soil with second humus horizon (section 8); в – forest steppe microarena: black humified stratosoil (section 7), agrochernozem clayey-illuvial typical (section 12), agrochernozem clayey-illuvial (section 13). Names of soil horizons according to [Klassifikatsiya..., 2004]

$\dot{a}$

Катены		Тундровые									Тасжыные									Лесостепные											
Профиль		п			ц			л			п			ц			л			п ₁			ц			п ₂					
Ландшафт		А	ТЭ	ТЭА	А	ТЭ	ТЭА	А	ТЭ	ТЭА	А	ТЭ	ТЭА	А	ТЭ	ТЭА	А	ТЭ	ТЭА	А	ТЭ	ТЭА	А	ТЭ	ТЭА	А	ТЭ	ТЭА			
Фракции	I																														
	II																														
	III																														
	IV																														
	V																														
	VI																														
Гумус																															
Co	1																														
	2																														
	3																														
	4									/																					
Cr	1																														
	2																														
	3																														
	4									/																					
Cu	1																														
	2																														
	3																														
	4									/																					
Fe	1																														
	2																														
	3																														
	4									/																					
Mg	1																														
	2																														
	3																														
	4									/																					
Pb	1																														
	2																														
	3																														
	4									/																					
Sr	1																														
	2																														
	3																														
	4									/																					

б



Рис. 4. Латеральное распределение гранулометрических фракций, гумуса и форм металлов в гумусовом горизонте катен. Катены: п – правая, ц – центральная, л – левая; косая – содержание ниже предела обнаружения; прочерк – нет данных.

Форма металлов: 1 – обменная, 2 – органоминеральная, 3 – специфически сорбированная гидроксидами Fe и Mn, 4 – силикатная и валовое содержание; прочерк – содержание ниже предела обнаружения.

Гранулометрические фракции: I – крупнопесчаная и среднеспесчаная, II – мелкпесчаная, III – крупнопылеватая, IV – среднеспылеватая, V – мелкпесчаная, VI – илистая. Значения коэффициента L: 5 – <0,2; 6 – 0,3–0,7; 7 – 0,8–1,3; 8 – 1,4–1,9; 9 – 2,0–4,9; 10 – 5,0–20; 11 – >21

Fig. 4. Lateral distribution of granulometric fractions, humus and metal forms in humus horizon of catenae. Catenaes: r – right, c – central, l – left; oblique line – concentration less than detectable limit; dash line – data absent.

Metal forms: 1 – exchangeable, 2 – organic matter bounded, 3 – Fe and Mn oxide fractions, 4 – silicic and total content; dash line – concentration less than detectable limit.

Granulometric fractions: I – coarse and medium sand, II – fine sand, III – coarse silt, IV – medium silt, V – fine silt, VI – mud.

Coefficient L values: 5 – <0,2; 6 – 0,3–0,7; 7 – 0,8–1,3; 8 – 1,4–1,9; 9 – 2,0–4,9; 10 – 5,0–20; 11 – >21

чено содержание органоминерального Mn (таблица). В глееземах автономного ландшафта катены левого борта балки больше доля илистой фракции, что, вероятно, привело к увеличению содержания обменных форм Ni, Cu, Mn, Zn, органоминеральных Co, Mn, Pb, Sr, специфически сорбированных Co, Mn, Zn, силикатных Co, Pb и валового Co; для большинства элементов это подтверждается значимой корреляцией с ней ($r=0,35\div0,64$, $n=36$).

В тундровых катенах латеральное распределение металлов высококонтрастно (рис. 4). В подчиненных ландшафтах максимально содержание валовых и силикатных Mn, Co, Cu и Pb ($L=1,3\div2,1$), вероятно, из-за их накопления на латеральном биогеохимическом барьере (рис. 4), который ранее отмечался в таежных песчаных катенах Н–Fe-класса Мещеры и бассейна Оки [Авессаломова, 2012]. Повышенное содержание Mn и Cu выявлено ранее в песчаных катенах тундр Западной Сибири [Московченко, 1998]. В почвах днища балки тундровой микроарены понижено содержание валового Cr и силикатного Pb ($L=0,6$). Содержание Fe, Sr, Ni и Zn изменяется мало ($L=1,0\div1,2$).

В почвах склонов на кислородном барьере накапливаются обменные соединения Mn, Cu и Zn, а также Sr ($L=2\div10$). В днище балки рассеиваются Sr и Cu ($L<0,4$) и накапливается Zn ($L=2$). Равномерно распределены Fe, Co, Cr, Ni и Pb ($L=0,8\div1,0$).

Органоминеральные соединения Fe аккумулируются в почвах подчиненных ландшафтов ($L=4\div12$), а Pb рассеиваются ($L<0,4$). Содержание этой формы Co и Sr ниже порога чувствительности метода. Остальным металлам свойственно сложное распределение. Mn и Zn рассеиваются в почвах склонов ($<0,7$) и накапливаются в днище балки ($L=1,3\div21$);

Ni и Cu характеризуются обратной закономерностью ($L=2,5\div2,6$ и $0,6\div0,9$ соответственно).

Специфически сорбированные Mn, Co, Ni и Zn накапливаются на биогеохимическом барьере в почвах подчиненных ландшафтов, Pb – только в глееземах и криометаморфических почвах днища балки ($L=1,4\div7,1$), Fe рассеивается в почвах склонов, Cu – в днище балки ($L=0,6\div0,7$). Содержание Cr остается постоянным, а Sr – не превышает порога чувствительности.

Изменение содержания песчаной фракции, гумуса и окислительно-восстановительных условий среды привело к высококонтрастному распределению металлов в гумусовом горизонте почв тундровых катен с преимущественным накоплением в подчиненных ландшафтах (рис. 4).

Тяжелые катены. В легкосуглинистых остаточно-карбонатных подзолистых, дерново-подзолистых почвах и глееземах таежных катен на юго-западе Мезенско-Вычегодской равнины преобладает песчаная фракция и лишь в отдельных образцах – мелко- и крупнопылеватая. В горизонте АУ величина pH слабо варьирует, увеличиваясь с глубиной от 4,0 до 7,4 в автономных подзолистых почвах и от 5,2 до 6,6 в дерново-подзолистых почвах и глееземах трансэлювиально-аккумулятивных ландшафтов (рис. 3,б). Содержание $C_{орг}$ уменьшается с глубиной с 25% в органогенных горизонтах до 1,5% в АУ и 0,1% в ВТ с локальным максимумом во втором гумусовом горизонте, где его в 1,5–2 раза больше, чем в горизонте ЕL.

В почвах склонов и в днище балки таежной микроарены увеличивается доля мелкого песка ($L=1,4\div1,5$) за счет крупной пыли ($L=0,8$). Значения pH в верхнем корнеобитаемом слое почв увеличи-

ваются с 4–5 в автономных ландшафтах до 6 в подчиненных, вероятно, из-за влияния грунтовых вод, насыщающихся ионами Ca^{2+} и Mg^{2+} при прохождении через толщу карбонатных моренных суглинков. Среднее содержание гумуса в почвах подчиненных ландшафтов в 2,3 раза меньше, чем в остаточно-карбонатных подзолистых почвах междуречья при высоком уровне вариабельности ($C_v=100\%$).

В подзолистых почвах автономных ландшафтов левого борта балки повышена гумусность, что привело к увеличению содержания обменных соединений Mn, органоминеральных Cu, Zn и специфически сорбированных Zn (таблица). Для Cu и Mn это подтверждается значимыми значениями коэффициента корреляции с содержанием гумуса: $r=0,57$ и $0,64$ соответственно ($n=64$).

В гумусовом горизонте почв таежных катен на юго-западе Мезенско-Вычегодской равнины латеральное распределение металлов контрастно: $0,4 < L < 5,0$ (рис. 4). Почвы автономных и подчиненных ландшафтов по содержанию валовых и силикатных соединений практически не отличаются ($L=0,8 \div 1,2$). Только Pb рассеивается ($L=0,4$) в остаточно-карбонатных дерново-подзолистых почвах склонов, а в глееземах увеличивается валовое содержание Mn ($L=1,5$). В почвах подчиненных ландшафтов повышенное содержание Mn ранее отмечалось в таежных катенах Смоленско-Московской возвышенности, заповедника Тульские засеки на покровных и моренных суглинках и на песчаных в Мещере [Геохимия..., 1983; Побединцева, Дианова, 1983; Ландшафтно-геохимические..., 1989; Касимов и др., 2003]. В таежных катенах равномерное распределение валовых Fe и Cr выявлено на покровных и моренных суглинках на юге Смоленско-Московской возвышенности [Касимов и др., 2003], Ni и Zn – в заповеднике Тульские засеки [Побединцева, Дианова, 1983], Cu – в Мещере [Ландшафтно-геохимические..., 1989].

Распределение подвижных и слабоподвижных соединений металлов контрастнее валовых и силикатных. В почвах подчиненных позиций рассеиваются обменные Fe, Cr, Cu, Ni ($L=0,4 \div 0,7$), органоминеральные Cu, Zn ($L=0,6 \div 0,7$) и специфически сорбированные Ni и Zn ($L < 0,6$). Накопление свойственно всем подвижным формам Mn ($L=1,3 \div 2,4$) и Sr, органоминеральным Co и Ni, специфически сорбированным Co и Cr ($L=1,6 \div 5,0$). Формы остальных металлов распределены равномерно в гумусовом горизонте подзолистых, дерново-подзолистых почв и глееземов.

Несмотря на условия, благоприятные для выноса металлов (увеличение доли песчаных фракций и снижение гумусности), в почвах подчиненных ландшафтов, частота встречаемости значений коэффициента близка – $L < 0,8$ и $L > 1,3$. Это указывает на то, что в таежных катенах на юго-западе Мезенско-Вычегодской равнины с подзолистыми почвами и глееземами растительность захватывает биогенные элементы за счет повышенной продуктивности или консервации в мортмассе, что ранее отмечалось для

валового содержания металлов в кислых таежных катенах центра Восточно-Европейской равнины [Авессаломова, 2012]. На биогеохимическом барьере в почвах нижних звеньев катен накапливаются подвижные формы Co, Mn и Sr.

В таежных катенах с подзолистыми и дерново-подзолистыми остаточно-карбонатными почвами и глееземами латеральная почвенно-геохимическая структура металлов контрастна, повышена аккумуляция подвижных соединений микроэлементов (Co, Mn, Sr и Zn) на биогеохимическом барьере в почвах подчиненных ландшафтов.

Лесостепные катены. В средне-тяжелосуглинистых выщелоченных и оподзоленных черноземах и лугово-черноземных почвах лесостепных катен Плавского плато преобладает крупная пыль (рис. 3, в). Черноземы содержат в горизонтах PU и AU 5,0% гумуса и имеют слабокислую (pH 5,2–5,9) реакцию среды, возрастающую до 6,0–7,2 в горизонтах VI и BC_{Amc}. В лугово-черноземных почвах днища балки содержание $C_{\text{орг}}$ и величина pH в верхней метровой толще варьируют в пределах 4,0–6,0% и 5,0–6,0 соответственно [Семенков и др., 2013].

Выщелоченные черноземы автономных ландшафтов трех катен сходны по гранулометрическому составу, величине pH и гумусности (таблица). Небольшие различия в доле песчаных фракций несущественно влияют на содержание форм металлов. В одной из катен правого борта повышенное содержание обменных соединений Zn, вероятно, обусловлено большей природной вариабельностью его соединений ($C_v=92\%$).

В лесостепных катенах Плавского плато латеральное распределение металлов в гумусовых горизонтах почв преимущественно равномерное из-за их слабоконтрастной дифференциации по физико-химическим свойствам, что, вероятно, типично для лесостепных и степных катен с черноземами и лугово-черноземными почвами и отмечалось ранее в литературе [Снытко, 1978; Касимов и др., 1992; Щеглов и др., 2013].

Наиболее контрастно распределены Pb и Zn, соединения которых накапливаются преимущественно в подчиненных ландшафтах ($L=1,3 \div 3,1$) (рис. 4), что ранее отмечалось для них в сходных по условиям миграции катенах Приволжской возвышенности [Касимов и др., 1992]. Рассеяние в оподзоленных черноземах склонов характерно для специфически сорбированного Zn, силикатных соединений и валового содержания Pb ($L=0,4 \div 0,7$). Также повышена контрастность дифференциации у силикатных соединений Mn ($L=0,7$) и органоминеральных Cr ($L=0,7 \div 2,0$).

В лесостепных катенах с выщелоченными и оподзоленными черноземами и лугово-черноземными почвами выявлено слабоконтрастное латеральное распределение гранулометрических фракций, pH, гумуса и различных форм металлов.

Таким образом, от тундровых катен к таежным и лесостепным (рис. 4) из-за более однородного распределения гранулометрических фракций, величины

pH и содержания гумуса уменьшается контрастность латерального распределения форм металлов. Между частотой обнаружения сходного латерального распределения металлов на одной микроаре и значением коэффициента вариации их содержания в гумусовом горизонте почв выявлена обратная зависимость: коэффициент корреляции Спирмана составляет $r = -(0,30-0,81)$ ($n=53$), т.е. в разных катенах одной микроарены при небольшом числе проб из почв автономных ландшафтов и высокой вариабельности содержания металлов формируются разные структуры латерального распределения.

В подчиненных ландшафтах большинства тундровых, таежных и лесостепных катен аккумулируются обменные Mn, Co и Zn. Мигрирующие и накапливающиеся в подчиненных ландшафтах тундровых и таежных катен обменные соединения Co, Pb, Sr, органоминеральные и специфически сорбированные соединения Fe распределяются равномерно в лесостепных катенах.

Выводы:

– в ряду почв глееземы Большеземельской тундры – подзолистые почвы Мезенско-Вычегодской равнины – выщелоченные черноземы Плавского плато уменьшается валовое содержание Pb и увеличивается содержание Fe, Ni, Zn, Cu и Mn. Содержание обменных форм Fe, Cu, Zn и специфически сорбированного Fe уменьшается из-за смены глеевой обстановки на кислородную; увеличивается содержание органоминеральных соединений Pb, Co, Ni,

Zn, аккумулирующихся на биогеохимическом барьере в гумусовых горизонтах;

– на юге Большеземельской тундры в катенах с глееземами и криометаморфическими почвами на лёссовидных суглинках изменение содержания илистой фракции, гумуса и окислительно-восстановительных условий среды привело в подчиненных ландшафтах к контрастному увеличению содержания подвижных форм Fe, Mn, Co, Cr, Pb, Sr и Zn;

– на юго-западе Мезенско-Вычегодской равнины в катенах с подзолистыми и дерново-подзолистыми остаточными карбонатными почвами и глееземами на карбонатных моренных суглинках с уменьшающейся концентрацией крупной пыли и гумуса и увеличивающимся содержанием мелкого песка и pH установлено контрастное латеральное распределение Mn, Co, Cu, Ni, Pb, Zn из-за аккумуляции их подвижных соединений на биогеохимическом барьере в почвах подчиненных ландшафтов;

– на Плавском плато в катенах с выщелоченными и оподзоленными черноземами и лугово-черноземными почвами на лёссовидных суглинках, слабоконтрастных по латеральному распределению гранулометрических фракций, величины pH и содержания гумуса, концентрация форм металлов в почвах автономных и подчиненных ландшафтов отличается мало;

– уменьшение контрастности изменения физико-химических свойств почв в ряду тундровые – таежные – лесостепные катены ведет к уменьшению контрастности латеральной дифференциации металлов.

Благодарности. Полевые и химико-аналитические исследования выполнены в 2009–2010 гг. в рамках проекта Минобрнауки РФ с МГУ (соглашение № 8673), обобщение полученных результатов – за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-27-00083).

Авторы благодарны Н.Н. Ивановой, В.В. Каганову, Д.В. Карелину, А.В. Почикалову, М.П. Тентюкову за помощь в сборе материала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Авессаломова И.А. Катенарная геохимическая организация таежных ландшафтов Восточно-Европейской равнины // Геохимия ландшафтов и география почв. 100 лет со дня рождения М.А. Глазовской. М.: АПР, 2012. С. 97–117.
- Буданцева Н.А., Горшков Е.И., Исаев В.С. и др. Инженерно-геологические и геохимические особенности бутристых ландшафтов в районе учебно-научного полигона «Хановей» // Инженерная геология. 2015. № 3. С. 4–20.
- Виноградов А.П. Среднее содержание химических элементов в главных типах изверженных пород земной коры // Геохимия. 1962. № 7. С. 555–571.
- Канев В.В. Динамика содержания кислоторастворимых соединений железа в дерново-подзолистых почвах южной части республики Коми // Почвоведение. 2011. № 11. С. 1312–1326.
- Касимов Н.С., Самонова О.А., Асеева Е.Н. Фоновая почвенно-геохимическая структура лесостепи Приволжской возвышенности // Почвоведение. 1992. № 8. С. 5–22.
- Касимов Н.С., Самонова О.А., Кошелева Н.Е. Фоновая геохимическая дифференциация ландшафтов смешанных лесов центра Русской равнины // География и окружающая среда. СПб.: Наука, 2003. С. 261–277.
- Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
- Ковда В.А., Якушевская И.В., Тюрюканов А.Н. Микроэлементы в почвах Советского Союза. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1959. 67 с.
- Ландшафтно-геохимические основы фоновоего мониторинга природной среды. М.: Наука, 1989. 264 с.
- Микроэлементы в почвах Советского Союза. Вып. 1. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1973. 282 с.
- Микроэлементы в почвах СССР. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1981. 252 с.
- Минкина Т.М., Мотузова Г.В., Назаренко О.Г. Состав и соединения тяжелых металлов в почвах. Р. на/Д: Эверест, 2009. 208 с.
- Московченко Д.В. Нефтегазодобыча и окружающая среда: эколого-геохимический анализ Тюменской области. Новосибирск: Наука, 1998. 112 с.
- Никифорова Е.М. Микроэлементы в южнотаежных ландшафтах Валдайской возвышенности // Геохимия ландшафта и практика народного хозяйства. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1979. С. 57–93.
- Побединцева И.Г., Дианова Т.М. Тяжелые металлы в широкотравяных лесах заповедника «Тюльские засеки» // Тяжелые металлы в природных и техногенных ландшафтах. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1983. С. 46–62.

Самсонова В.П. Пространственная изменчивость почвенных свойств на примере дерново-подзолистых почв. М.: ЛК, 2008. 160 с.

Семенов И.Н., Асеева Е.Н., Терская Е.В. Геохимическая структура лесостепных катен балочного водосбора в бассейне р. Упа // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2013. № 6. С. 68–75.

Семенов И.Н., Касимов Н.С., Терская Е.В. Радиальная геохимическая структура почв лесостепных суглинистых катен балочного водосбора в центре Среднерусской возвышенности // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2015. № 5. С. 42–53.

Семенов И.Н., Мирошников А.Ю., Усачева А.А. Распределение цезия-137 глобальных выпадений в таежных и тундровых катенах бассейна реки Обь // Геология рудных месторождений. 2015. Т. 57, № 2. С. 154–173.

Снытко В.А. Геохимические исследования метаболизма в геосистемах. Новосибирск: Наука, 1978. 150 с.

Тонконогов В.Д. Автоморфное почвообразование в тундровой и таежной зонах Восточно-Европейской и Западно-Сибирской равнин. М.: Изд. Почвенного института имени В.В. Докучаева, 2010. 304 с.

Щеглов Д.И., Горбунова Н.С., Семенова Л.А., Хатунцева О.А. Микроэлементы в почвах сопряженных ландшафтов Каменной степи различной степени гидроморфизма // Почвоведение. 2013. № 3. С. 282–290.

Geochemical atlas of Europe. Pt. 1. Background information, methodology and maps. Espoo: Geol. Surv. of Finland, 2005. 526 p.

Kabata-Pendias A. Trace Elements in soils and plants. L.; N.Y.: CRC Press, 2011. 505 p.

Reimann C., Birke M., Demetriades A. et al. Chemistry of Europe's Agricultural Soils. Pt. A. Hannover: BGR, 2014. Data DVD.

Поступила в редакцию 11.03.2016
Принята к публикации 18.03.2016

I.N. Semenov¹, N.S. Kasimov², E.V. Terskaya³

LATERAL DISTRIBUTION OF METAL FORMS IN TUNDRA, TAIGA AND FOREST STEPPE CATENAE OF THE EAST EUROPEAN PLAIN

To evaluate the metal migration pathways, we investigated the lateral distribution of exchangeable, organic matter bounded, Fe and Mn oxide fractions of metals, as well as the total content of Fe, Mn, Co, Cr, Cu, Ni, Pb, Sr, Zn in a model loamy catenae of the southern Bol'shezemel'skaya tundra, southwestern Mezen'-Vychegda Plain, and Plavsk Plateau. Soils were shown to be depleted in Fe, Sr, and Mn, whereas other metals have close to clark concentrations. In the succession of catenae tundra-taiga-forest steppe, the total concentration of Pb decreases, as do the total concentrations of exchangeable compounds of Fe, Cu, Zn and Fe oxide fractions of metals. Contrary, the total content of Fe, Ni, Zn, Cu, Mn, organic matter bounded Pb, Ni, Co and Zn increase. The lateral distribution of metal forms becomes more even in the direction from tundra to taiga, and further to forest steppe catenae.

Keywords: catena, catchment, lateral distribution, mobility of metals, gley soils, cryometamorphic soils, sod-podzolic soils, chernozem, East European Plain.

Acknowledgements. The study was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research (project N 14-05-00222). We are thankful to N.N. Ivanova, V.V. Kaganov, D.V. Karelin, A.V. Pochikalov, M.P. Tentyukov for their assistance in data collection.

REFERENCES

Avessalomova I.A. Katenarnaja geohimicheskaja organizacija taezhnyh landshaftov Vostochno-Evropejskoj ravniny [Catenary geochemical organization of taiga landscapes in East European Plain], Geohimija landshaftov i geografija pochv. 100 let so dnja rozhdenija M.A. Glazovskoj, Moscow, APR, 2012, pp. 97–117 (in Russian).

Budanceva N.A., Gorshkov E.I., Isaev V.S. i dr. Inzhenerno-geologicheskie i geohimicheskie osobennosti bugristyh landshaftov v rajone uchebno-nauchnogo poligona «Hanovej» [Engineering-geological and geochemical features of palsa and litala landscapes in the area of the Khanovey science education station], Inzhenernaja geologija, 2015, no 3, pp. 4–20 (in Russian).

Geochemical Atlas of Europe. Pt. 1. Background information, methodology and maps. Espoo, Geol. Surv. of Finland, 2005, 526 p.

Kabata-Pendias A. Trace Elements in soils and plants. L.; N.Y., CRC Press, 2011, 505 p.

Kanev V.V. Dinamika sodержanija kislotorastvorimyh soedinenij zheleza v dernovo-podzolistyh pochvah juzhnoj chasti respubliki Komi [Dynamics of acid-soluble iron compounds in soddy-podzolic soils of the Southern Komi Republic], Pochvovedenie, 2011, no 11, pp. 1312–1326 (in Russian).

Kasimov N.S., Samonova O.A., Aseeva E.N. Fonovaja pochvenno-geohimicheskaja struktura lesostepi Privolzhskoj vozvyshehnosti [Background soil-geochemical structure of Privolzhskaya Upland forest-steppe], Pochvovedenie, 1992, no 8, pp. 5–22 (in Russian).

Kasimov N.S., Samonova O.A., Kosheleva N.E. Fonovaja geohimicheskaja differenciacija landshaftov smeshannyh lesov centra Russkoj ravniny [Background geochemical differentiation of mixed forests in the Central Russian Upland], Geografija i okruzhajushhaja sreda, Sankt-Peterburg, Nauka, 2003, pp. 261–277 (in Russian).

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Landscape Geochemistry and Soil Geography, Junior Research Scientist; e-mail: semenkov@igem.ru

² Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography Department of Landscape Geochemistry and Soil Geography, Head of the Department, Faculty President, Academician RAS, D.Sc. in Geography; e-mail: secretary@geogr.msu.ru

³ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Landscape Geochemistry and Soil Geography, Research Scientist; e-mail: elena_terskaya@mail.ru

Klassifikacija i diagnostika pochv Rossii [Classification and diagnostics of soils of Russia], Smolensk, Ojkumena, 2004, 342 p. (in Russian).

Kovda V.A., Jakushevskaja I.V., Tjurjukonov A.N. Mikrojelementy v pochvah Sovetskogo sojuza [Microelements in soils of the Soviet Union], Moscow, Izd-vo Moskovskogo universiteta, 1959, 67 p. (in Russian).

Landsaftno-geohimicheskie osnovy fonovogo monitoringa prirodnoj sredy [Landscape-geochemical basis of environmental impact assessment], Moscow, Nauka, 1989, 264 p. (in Russian).

Mikrojelementy v pochvah Sovetskogo Sojuza [Trace elements in soils of the USSR], vyp. 1, 1973, 282 p. (in Russian).

Mikrojelementy v pochvah SSSR [Trace elements in soils of the USSR], Moscow, Izd-vo Moskovskogo universiteta, 1981, 252 p. (in Russian).

Minkina T.M., Motuzova G.V., Nazarenko O.G. Sostav i soedinenija tjazhelyh metallov v pochvah [Composition and compounds of heavy metals in soils], Rostov-na-Donu, Jeverest, 2009, 208 p. (in Russian).

Moskovchenko D.V. Neftegazodobycha i okruzhajushhaja sreda: jekologo-geohimicheskij analiz Tjumenskoj oblasti [Oil-and-gas-field operation and environment: eco-geochemical analysis in Tumenskaya oblast'], Novosibirsk, Nauka, 1998, 112 p. (in Russian).

Nikiforova E.M. Mikrojelementy v juzhnotaezhnyh landsaftah Valdajskoj vozvyshehnosti // Geohimija landsafta i praktika narodnogo hozjajstva [Microelements in the south taiga landscapes in the Valday Hills], Moscow, Izd-vo Moskovskogo universiteta, 1979, pp. 57–93 (in Russian).

Pobedinceva I.G., Dianova T.M. Tjazhelye metally v shirokolistvennyh lesah zapovednika «Tul'skie zaseki» [Heavy metals in the broad-leaves forests in the reserve «Tul'skie zaseki»], Tjazhelye metally v prirodnyh i tehnogennyh landsaftah. Moscow, Izd-vo Moskovskogo universiteta, 1983, pp. 46–62 (in Russian).

Reimann C., Birke M., Demetriades A. et al. Chemistry of Europe's agricultural soils. Pt. A. Hannover: BGR, 2014. Data DVD.

Samsonova V.P. Prostranstvennaja izmenchivost' pochvennyh svojstv na primere dernovo-podzolistykh pochv [Spatial variability

of soil conditions on the example of soddy-podzolic soils], Moscow, LK, 2008, 160 p. (in Russian).

Semenkov I.N., Aseeva E.N., Terskaja E.V. Geohimicheskaja struktura lesostepnyh katen balochnogo vodosbora v bassejne r. Upa [Geochemical structure of forest-steppe catenas of a balka drainage area in the Upa River basin], Vestnik Moskovskogo universiteta, Ser. 5, Geografija, 2013, no 6, pp. 68–75 (in Russian).

Semenkov I.N., Kasimov N.S., Terskaja E.V. Radial'naja geohimicheskaja struktura pochv lesostepnyh suglinistykh katen balochnogo vodosbora v centre Srednerusskoj vozvyshehnosti [Radial geochemical structure of loamy soils of forest-steppe catenas of the beam catchment area in the centre of Central Russian Upland], Vestnik Moskovskogo universiteta. Ser. 5, Geografija, 2015, no 5, pp. 42–53 (in Russian).

Semenkov I.N., Miroshnikov A.Ju., Usacheva A.A. Raspredelenie cezija-137 global'nyh vypadenij v taezhnyh i tundrovnyh katenah bassejna reki Ob' [Distribution of global fallouts cesium-137 in taiga and tundra catenae at the Ob river basin], Geologija rudnyh mestorozhdenij, 2015, vol. 57, no 2, pp. 154–173 (in Russian).

Shheglov D.I., Gorbunova N.S., Semenova L.A., Hatunceva O.A. Mikrojelementy v pochvah sopryazhennykh landsaftov Kamennoj stepi razlichnoj stepeni gidromorfizma [Microelements in soils of conjugated landscapes with different degrees of hydromorphism in the Kamennaya steppe], Pochvovedenie, 2013, no 3, pp. 282–290 (in Russian).

Snytko V.A. Geohimicheskie issledovanija metabolizma v geosistemah [Geochemical studies of metabolism in geosystems], Novosibirsk, Nauka, 1978, 150 p. (in Russian).

Tonkonogov V.D. Avtomorfnoe pochvoobrazovanie v tundrovoj i taezhnoj zonah Vostochno-Evropejskoj i Zapadno-Sibirskoj ravnin [Automorphous soil-forming in tundra and taiga in the East European and West Siberian Plains], Moscow, Pochvennyj institut imeni V.V. Dokuchaeva, 2010, 304 p. (in Russian).

Vinogradov A.P. Srednee sodержanie himicheskikh jelementov v glavnyh tipah izverzhennykh porod zemnoj kory [Average concentration of chemical elements in main types of abyssal rocks in Earth crust], Geohimija, 1962, no 7, pp. 555–571 (in Russian).

Received 11.03.2016

Accepted 18.03.2016

ГЕОХИМИЯ ТЕХНОГЕННЫХ ЛАНДШАФТОВ

УДК 631.48

Е.М. Никифорова¹, Н.Е. Кошелева², Т.С. Хайбрахманов³

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПОСЛЕДСТВИЯ ПРИМЕНЕНИЯ ПРОТИВОГОЛОЛЕДНЫХ РЕАГЕНТОВ ДЛЯ ПОЧВ ВОСТОЧНОГО ОКРУГА МОСКВЫ

Изучены экологические последствия многолетнего применения противогололедных реагентов (ПГР) на территории Восточного административного округа (ВАО) Москвы, проявившиеся в антропогенном засолении и осолонцевании почв. Рассмотрен химический состав вносимых реагентов, уровни содержания и особенности распределения легкорастворимых солей и обменных катионов в снеговых водах и почвах зон разного функционального назначения. Причина развития засоления и солонцеватости почв – входящие в состав ПГР смеси солей на основе NaCl и катион натрия, вызывающий диспергацию и пептизацию почвенных коллоидов, которые под влиянием электролитов солей коагулируют, повышая плотность почв. Подщелачивание снежного покрова ВАО характеризуется увеличением pH по сравнению с фоном в среднем на 0,6; средняя минерализация талой воды составляет 19,4 мг/л, что в 2 раза выше фона. По ионному составу снеговые воды относятся к хлоридно-натриевому и хлоридно-кальциевому типам, что объясняется влиянием солей NaCl и CaCl₂, доминирующих в составе ПГР.

Городские почвы, наследуя химический состав снега, приобрели нейтральную реакцию (среднее значение pH 7,2), повышенную в 16–20 раз относительно фона минерализацию (15,2 смоль(экв)/кг) и высокоплотный остаток (0,48%). В составе почвенного раствора преобладают ионы Cl и Na со значениями коэффициента накопления $K_c \approx 100$. По данным за 2010 г. большая часть городских почв имеет среднюю степень засоления и слабую степень солонцеватости. В почвенном покрове сформировались протяженные и контрастные техногенные аномалии солей и обменного Na. Наибольшая степень засоления NaCl и CaCl₂ (до 1,3–1,6% плотного остатка) и солонцеватости (до 12–14,5% от суммы катионов) свойственна почвам в транспортной и промышленной зонах. Карты содержания легкорастворимых солей и обменного натрия в поверхностном слое почв, составленные на территорию ВАО, показали разную степень деградации почвенного покрова в результате развития в них антропогенной солонцеватости. Процессы деградации затронули свыше 50% территории округа. К разряду сильно- и среднедеградированных отнесены почвы вблизи крупных автомагистралей с общей площадью 22,2%. В центре округа распространены слабodeградированные почвы, занимающие 32% территории. Недеградированные почвы с площадью 45,8% сохранились в селитебной зоне южнее ш. Энтузиастов, а также в парке Кусково и на востоке округа за МКАД.

Ключевые слова: городские почвы, противогололедные реагенты, засоление, осолонцевание, техногенные аномалии, Москва.

Введение. Применение противогололедных реагентов (ПГР) на автомагистралях, тротуарах и во дворах жилых кварталов крупных городов и городских агломераций в зимний период приводит к негативным экологическим последствиям, которые затрагивают все компоненты ландшафта [Ramakrishna, Viraraghavan, 2005]. В наибольшей степени страдают почвы, служащие депонирующей средой для многих токсичных соединений, входящих в состав ПГР. Используемые реагенты представляют собой активные вещества, которые отрицательно влияют на химический состав снежного покрова и почв, повреждают городские посадки и приводят к коррозии металлических предметов (мостов, автомобилей, труб), разрушению историчес-

ких памятников и объектов архитектуры, наносят вред здоровью людей.

Наиболее опасное экологическое следствие применения ПГР в Восточном административном округе (ВАО) Москвы – антропогенное засоление почв и их последующее осолонцевание, обусловленное вхождением обменного натрия в состав почвенного поглощающего комплекса (ППК). При этом происходит еще более кардинальное, чем при засолении, ухудшение свойств городских почв с изменением их катионного состава, нарушением режима функционирования и устойчивости к загрязнению. Несмотря на актуальность проблемы, засоление и солонцеватость практически не изучены в почвах северных мегаполисов, крупных промышленных центров и городских агломераций.

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра геохимии ландшафтов и географии почв, ст. науч. с., канд. геогр. н.; e-mail: nikiiforova-geo@mail.ru

²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра геохимии ландшафтов и географии почв, вед. науч. с., докт. геогр. н.; e-mail: nataalk@mail.ru

³Инженерно-технологический центр «Сканэкс», руководитель проектов, канд. геогр. н.; e-mail: haibrahmanov@scanex.ru

Антропогенные солонцеватые почвы – одна из форм и стадий засоления. Их диагностика в городах гумидной зоны затруднена из-за несоответствия между повышенным содержанием обменного натрия в составе ППК и слабо выраженными морфологическими признаками солонцеватости. В 1980-е гг. почвы Москвы были несолонцеваты [Обухов, Лепнева, 1990], но уже в начале 2000-х гг. этот процесс был диагностирован в почвах вблизи крупных автомагистралей, где содержание обменного натрия в поверхностном слое составило 24–43% от суммы катионов [Черноусенко и др., 2003].

Высокая концентрация обменного натрия в придорожных почвах вызывает диспергацию почвенных коллоидов, усиливая их подвижность вместе с органическим веществом и приводя к ухудшению водопроницаемости, увеличению плотности, нарушению дыхания и газового режима, сокращению видового разнообразия почвенной микрофлоры и значительным изменениям структуры микробных сообществ [Norrström, Bergstedt, 2001; Joutti et al., 2003; Kim, Koretsky, 2013]. Другое важное следствие осолонцевания почв – мобилизация тяжелых металлов, связанных с коллоидами и органическим веществом, и их вынос в грунтовые воды [Amrhein et al., 1992; Bäckström et al., 2004; Nelson et al., 2009; Li et al., 2015]. Засоленность и солонцеватость городских почв отрицательно влияют на состояние городских зеленых насаждений и часто служат причиной их стресса и гибели [Смагин и др., 2006; Шевякова и др., 2009; Герасимов, 2013; Bryson, Barker, 2002; Czerniawska-Kusza et al., 2004]. Сильнее других страдают почвы и растения вблизи крупных автомагистралей.

Основные средства, используемые в мире для удаления снега и льда с городских магистралей и тротуаров, представлены технической поваренной солью (твердый хлорид натрия, NaCl), песком и мелким щебнем [Николаев и др., 1998; Систер, Корецкий, 2004]. Наиболее негативно воздействует на почвы техническая поваренная соль. В Москве и городах РФ на соль в качестве ПГР перешли с 1993 г., так как во многих странах она считалась самым надежным средством борьбы с гололедом. В США и Европе ее применяют в дозировке 30 г/м², в России – до 150 г/м², что объясняется более суровыми климатическими условиями [Хомяков, 2013]. Максимальная доза хлоридных реагентов составляет 20 г/м² [Герасимов, 2013]. В США соль отнесена к вредным, токсичным реагентам, однако ее продолжают очень широко использовать во многих городах мира, в том числе в Москве.

В Москве смеси солей на основе хлористого натрия составляют 75–80%, а хлористые кальций, калий и формиат натрия – 25–20% от вносимой массы. Общая разрешенная солевая нагрузка доходит до 420–500 тыс. т за зимний сезон в пересчете на сухое вещество. При среднем соотношении жидких и твердых реагентов 3:1 минимальная солевая нагрузка составляет около 150 тыс. т. В последние годы объем используемых ПГР увеличился более

чем в 3 раза. Учитывая растущее применение ПГР, Москва вступает в опасный период «солевого стресса», когда на каждого жителя приходится 37 кг ПГР за сезон [Хомяков, 2013]. На территории ВАО состав ПГР на 95–96% состоит из технической поваренной соли [Никифорова и др., 2014].

Цель работы – оценить экологические последствия применения ПГР для почв ВАО Москвы, где они используются в течение многих лет во все возрастающем объеме. В основу статьи положены результаты почвенно-геохимической съемки, проведенной на территории округа в июле 2010 г. Для достижения цели решались следующие задачи:

- определение состава и уровня содержания легкорастворимых солей в ПГР, снеговых водах и в поверхностном (0–15 см) слое городских почв;
- выявление особенностей распределения легкорастворимых солей и обменного натрия в почвах фоновых и городских ландшафтов в зависимости от их функционального назначения;
- составление карт антропогенного засоления и солонцеватости почвенного покрова округа и выделение зон с разной степенью деградации почв в результате солонцеватости.

Материалы и методы исследований. Исследована южная часть ВАО, которая относится к южно-таежным ландшафтам Подмосковной Мещеры и представляет собой плоскую задровую равнину в междуречье Москвы и Клязьмы с абсолютными отметками 150–160 м, сложенную водно-ледниковыми и древнеаллювиальными отложениями. Почвенный покров значительно изменен в результате техногенеза и урбанизации, большие площади покрыты асфальтом. Поверхностный слой почв, как правило, состоит из загрязненного материала с включением строительно-бытового мусора и промышленных отходов. Почвообразующими породами служат насыпные грунты и (или) культурные наносы.

Физико-химические и химические свойства городских почв сильно трансформированы и по основным показателям не соответствуют зональным аналогам [Почва..., 1997; Касимов, Никифорова, 2004; Кошелева, Никифорова, 2007; Прокофьева и др., 2011; Кошелева и др., 2011]. Для них характерно подщелачивание верхней части профиля, утяжеление гранулометрического состава, увеличение содержания гумуса и элементов питания, емкости катионного обмена, изменение состава ППК и засоление, которые негативно отражаются на их экологических функциях.

Засоление и солонцеватость почв ВАО изучали путем их геохимического опробования, проводимого на основе функционального зонирования территории [Касимов, 1995; Касимов, Никифорова, 2004; Лабутина, Хайбрахманов, 2010]. Из поверхностного слоя городских почв отобрано 52 пробы и еще 10 фоновых проб – на территории Подмосковной Мещеры, в 45–50 км на восток от города. Карта функциональных зон и транспортной сети ВАО Москвы составлена на основе космических снимков сверхвысокого разрешения (рис. 1).

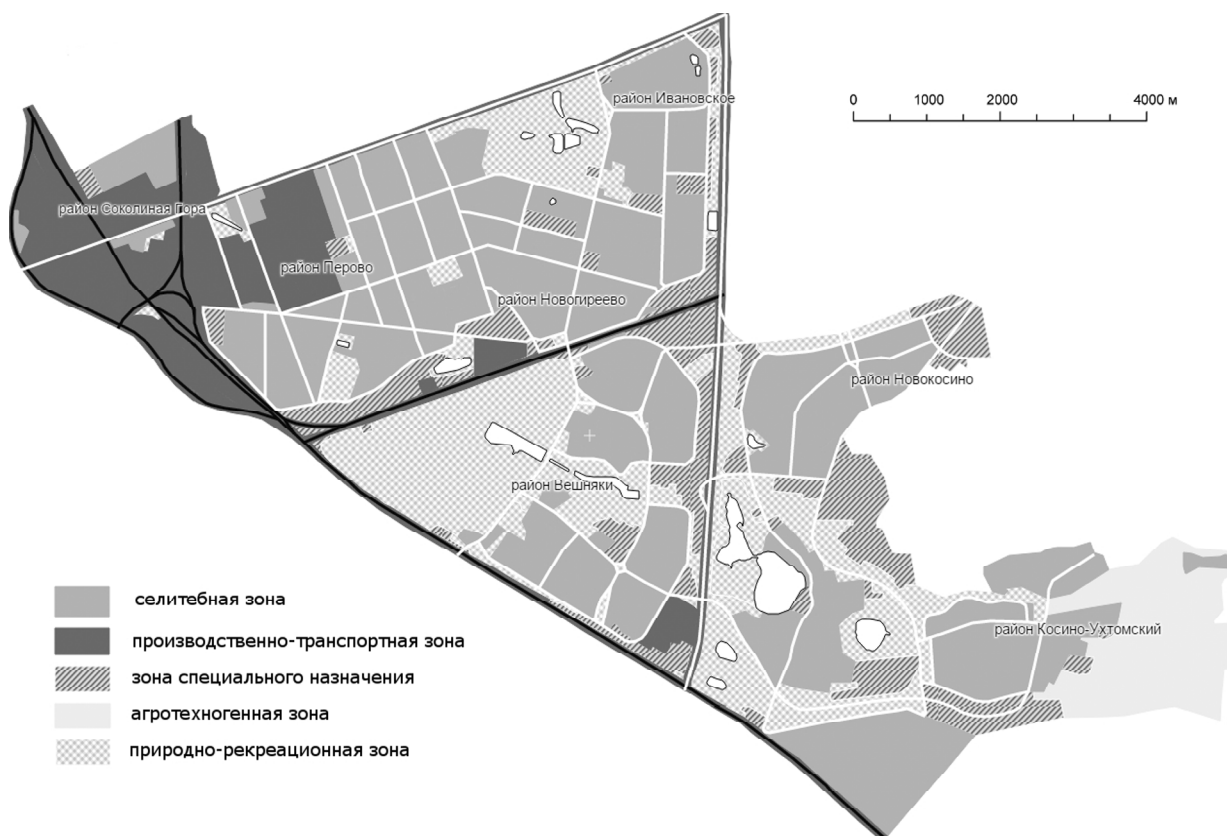


Рис. 1. Функциональные зоны, основная транспортная сеть и муниципальные районы южной части ВАО Москвы

Fig. 1. Land-use zones, the main transport network and municipal regions of the southern part of the Moscow EAD

Содержание легкорастворимых солей в почвах определяли в водной вытяжке (1:5) в Эколого-геохимическом центре географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, обменных катионов – методом Пфейффера в Испытательном центре Почвенного института имени В.В. Докучаева. Актуальную кислотность почв (рН) измеряли в водной суспензии на стационарном приборе «Эксперт-рН», гранулометрический состав – на лазерном микроанализаторе «Analizette 22».

Статистический анализ данных выполнен в программном пакете STATISTICA8, их обработка включала также расчет значений коэффициента накопления (K_c) (относительно фона). Степень солонцеватости почв рассчитывалась, как процент обменного натрия от суммы катионов. Засоление и солонцеватость почв оценивали по классификации [Засоленные..., 2006], степень их деградации – по [Методика..., 1994]. Картографирование содержания обменного натрия в поверхностном слое почв выполнено в пакете ArcGIS10 методом сплайнов.

Результаты исследований и их обсуждение. Химический состав снежного покрова в ВАО Москвы. Снег аккумулирует многие легкорастворимые соли, химические элементы и их соединения, выпадающие из загрязненной атмосферы города, а также вносимые с ПГР (табл. 1).

Снеговые воды фоновых ландшафтов Подмосковной Мещеры имеют кислый состав (рН 5,6) и пониженную минерализацию, в среднем равную

9,5 мг/л. Содержание ионов хлора и натрия в них также очень низкое – 1,55 и 0,74 мг/л соответственно. По преобладающему ионному составу они относятся к сульфатно-хлоридному кальциевому классу.

Снеговые воды городского ландшафта в ВАО характеризуются слабокислой реакцией (рН 6,2) с колебаниями в пределах 4,5–7,6. Подщелачивание снежного покрова относительно фоновых территорий составляет в среднем 0,6 ед. Наиболее высокие значения рН приурочены к промышленным зонам и автомагистралям, что обусловлено интенсивным использованием солевых реагентов. Средняя минерализация талой воды составляет 19,4 мг/л, т.е. в 2 раза выше фона. По ионному составу снеговые воды относятся к хлоридно-натриевому и хлоридно-кальциевому классам, что обусловлено высокими дозами ПГР и преобладанием в их составе солей CaCl_2 и NaCl . Полученные данные о химическом составе снега хорошо согласуются с результатами работ [Еремина, Григорьев, 2010; Касимов и др., 2012].

Засоление почв на территории ВАО. Городские почвы аккумулируют большую часть легкорастворимых соединений из снеговых вод, что приводит к их антропогенному засолению (табл. 2). Фоновые дерново-подзолистые почвы Подмосковной Мещеры, напротив, имеют в среднем кислую реакцию (рН 4,9), среднее содержание гумуса (4,7%), очень низкую минерализацию (0,75 смоль(экв)/кг), преимущественно

Таблица 1

Кислотность (рН), среднее содержание ионов легкорастворимых солей (мг-экв/л) и минерализация снеговых вод (М, мг/л) Подмосковной Мещеры и ВАО Москвы

Показатель	рН	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Fe ³⁺	NH ₄ ⁺	М, мг/л
Подмосковная Мещера, фон (n=5)												
Среднее	5,6	0,030	0,036	0,044	0,022	0,070	0,011	0,032	0,008	0,009	0,017	9,5
ВАО Москвы, весна 2010 г. (n=51)												
Среднее	6,2	0,067	0,044	0,197	0,025	0,168	0,011	0,076	0,014	—	0,003	19,4
Min	4,5	0,001	0,001	0,001	0,001	0,046	0,004	0,008	0,001	—	0,003	3,0
Max	7,6	0,377	0,123	4,51	0,054	1,15	0,025	2,09	0,134	—	0,003	236
K _c	—	2,2	1,2	4,5	1,1	2,4	1,0	2,4	1,8	—	0,2	2,0

Примечание. Здесь и в табл. 2 n – число проб; полужирным шрифтом выделены содержание и значения коэффициента накопления K_c доминирующих ионов. Прочерк – данные отсутствуют.

бикарбонатно-кальциевый состав ионов и небольшой плотный остаток (0,03%), что указывает на отсутствие засоления в их поверхностном слое.

Городские почвы характеризуются близкой к нейтральной реакцией среды (рН 7,2) при колебаниях в диапазоне 6,0–8,5, их подщелачивание относительно фона составляет 2,3 (табл. 2). Им свойственно утяжеление гранулометрического состава и накопление гумуса (до 7,0%). Минерализация почвенного раствора в среднем составляет 15,2 смоль(экв)/кг, что в 20 раз выше фона, а плотный остаток – ≤0,5%, что выше фона в 16 раз. Это соответствует средней степени засоления, которое создают в основном ионы хлора и натрия с концентрацией, почти в 100 раз превышающей фоновый уровень. Наряду с катионом натрия в городских почвах накапливается кальций (K_c=11), входящий в состав смесей в виде CaCl₂. Периодическая смена процессов засоления (зима-весна) и рассоления (лето-осень) при положительном балансе солей в профиле почв способствует их прогрессирующему засолению.

солей занимают большую площадь и отличаются высокой степенью засоления. Процесс антропогенного засоления почв затронул не только придорожные участки вблизи автомагистралей, но распространился практически по всей территории округа, включая районы, расположенные за МКАД. Максимальное содержание солей в почвах отмечено вдоль ш. Энтузиастов и МКАД. Наиболее контрастные аномалии (плотный остаток >1%) сформировались на северо-западе ВАО (районы Соколиная гора и Перово) под влиянием ш. Энтузиастов и промзон, а также на отдельных участках МКАД, образующих полосу шириной 150–200 м. Почвы вблизи крупных автомагистралей засолены настолько сильно, что на их поверхности в засушливые годы появляются выцветы хлоридно-натриевых солей в виде кристаллов галита [Черноусенко и др., 2003]. Аномалии со средней степенью засоления почв (0,4–0,6%) приурочены к автомагистралям и внутриквартальным дорогам. Незасоленные и слабозасоленные почвы (плотный остаток <0,2 и 0,2–0,4% соответственно) занимают небольшие участки в

Таблица 2

Величина рН и среднее содержание легкорастворимых солей (смоль(экв)/кг почвы) в поверхностном (0–15 см) слое почв Подмосковной Мещеры и ВАО Москвы

Показатель	рН	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Сумма ионов	Плотный остаток, %
Подмосковная Мещера, фон (n=5)											
Среднее	4,9	0,18	0,06	0,06	0,08	0,26	0,05	0,04	0,02	0,75	0,03
ВАО, лето 2010 г. (n=52)											
Среднее	7,2	1,72	0,32	5,15	0,42	2,99	0,57	3,97	0,07	15,2	0,48
Min	6,0	0,31	0,08	1,24	0,06	0,49	0,10	0,46	0,002	5,15	0,16
Max	8,5	5,03	1,44	18,2	6,34	10,8	1,83	16,7	0,60	52,5	1,64
K _c	—	9,6	5,3	85,8	5,2	11,5	11,4	99,2	3,5	20,3	16,0

Пространственную структуру загрязнения почв ВАО легкорастворимыми солями отражает карта засоления [Никифорова и др., 2014], выраженного в градациях плотного остатка (рис. 2). Ее анализ показал, что техногенные аномалии легкорастворимых

селитебных и рекреационных зонах – в районах Терлецких озер, Свободного просп., парка Кусково, улиц Юности, Молдагуловой и на востоке округа.

Осолонцевание засоленных почв в ВАО. Развитие процесса осолонцевания в городских почвах

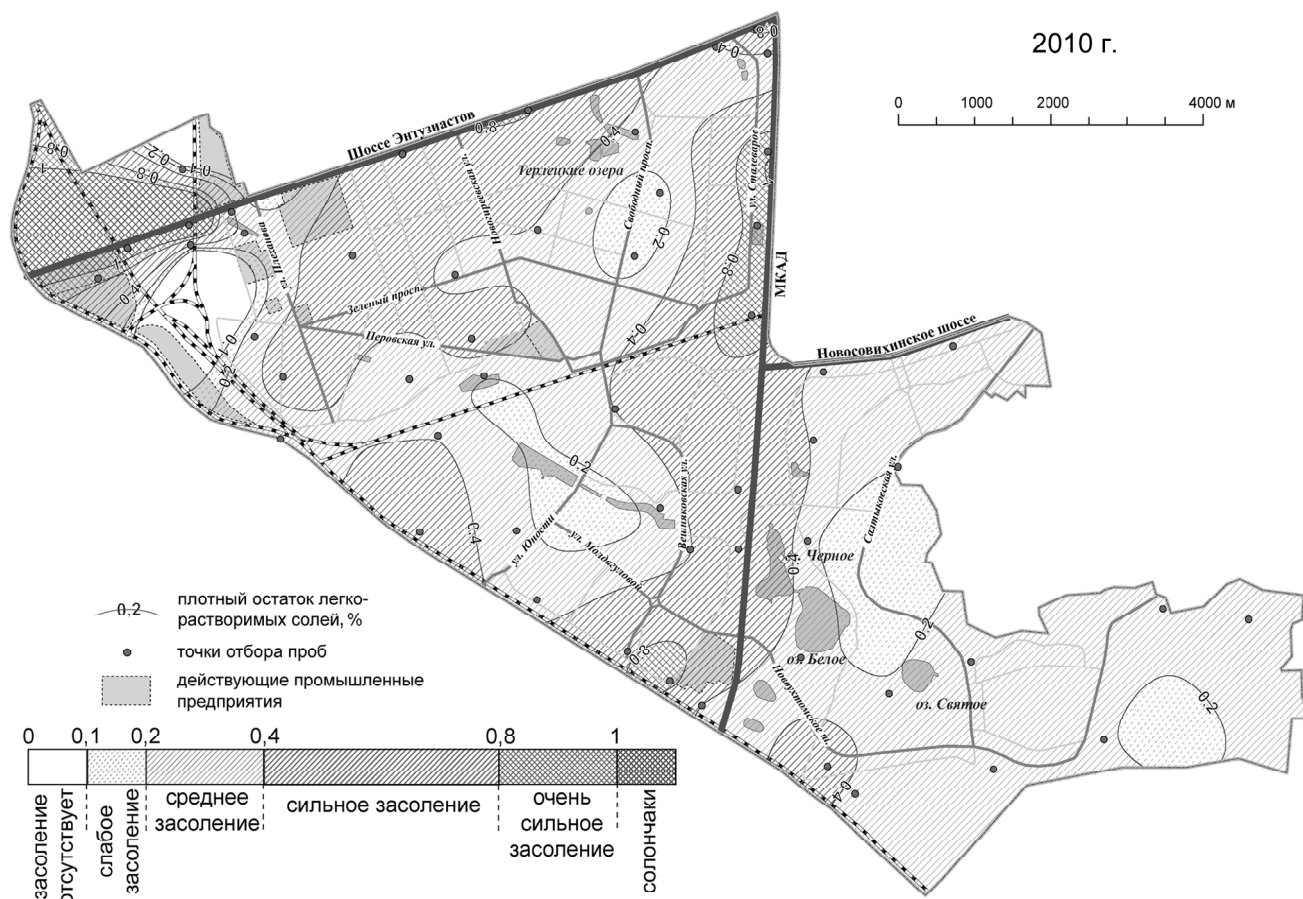


Рис. 2. Техногенные аномалии легкорастворимых солей (по плотному остатку, %) в поверхностном (0–15 см) слое почв БАО Москвы по данным съемки в июле 2010 г.

Fig. 2. Techogenic anomalies of soluble salts (dry residue, %) in the surface (0–15 cm) soil layer, Moscow EAD, July 2010

лесной зоны связано с поступлением иона натрия из ПГР и снега в почвенные воды, где он находится в основном в форме простой легкорастворимой соли NaCl. По мере сезонного рассоления (лето-осень) соли вымываются из профиля почв, а катион натрия входит в состав ППК, замещая часть обменных катионов кальция и магния. Возникновение и развитие солонцового процесса вызывают диспергацию и пептизацию почвенных коллоидов, которые, передвигаясь с растворами под влиянием электролитов солей, коагулируют и образуют иллювиальный солонцовый горизонт. Критериями для отнесения почв

к солонцовым согласно классификации [Brady, Weil, 1996] служат следующие показатели: доля обменного натрия (ESP) в ППК > 15%, емкость поглощения < 4,0 дСм/м и pH > 8,5. Риск диспергации почвенных коллоидов зависит от сочетания ESP и концентрации солей в водной вытяжке [Shainberg, Letey, 1984].

Фоновые дерново-подзолистые почвы Подмосковной Мещеры имеют низкое содержание всех поглощенных катионов в поверхностном горизонте, в том числе обменного натрия (0,13 смоль(экв)/кг, что составляет всего 1,4% от суммы катионов) (табл. 3). Это свидетельствует об отсутствии солонцеватос-

Таблица 3

Состав ППК, среднее содержание (смоль(экв)/кг почвы) и свойства поверхностного (0–15 см) слоя фоновых и городских почв в БАО Москвы

Показатели	Обменные катионы				Сумма катионов	Степень солонцеватости, %	Сумма легко-растворимых солей	Свойства почв	
	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺				гумус, %	pH _{вод}
Фоновые почвы Подмосковной Мещеры (n=10)									
Среднее	6,53	2,37	0,13	0,38	9,41	1,38	0,75	4,67	4,9
C _v , %	14,1	19,4	20,0	12,9	16,9	–	–	–	–
Почвы ВАО, 2010 г. (n=52)									
Среднее	8,63	1,30	0,80	0,34	11,07	7,22	15,2	7,0	7,2
C _v , %	39,7	49,2	93,4	55,9	62,9	–	–	–	–

ти в их профиле. Содержание обменных катионов в ППК однородно (значения коэффициента вариации C_v не превышают 20%).

Городские почвы в ВАО имеют положительный тренд антропогенной солонцеватости и характеризуются повышенным содержанием обменных катионов, в том числе поглощенного натрия (табл. 3). Их сумма в поверхностном слое почв в 2010 г. составила 11,07, а обменного натрия – 0,80 смоль(экв)/кг, что в 5 раз выше фона; степень солонцеватости достигла 7,2%. Согласно классификации [Засоленные..., 2006] в целом почвы ВАО можно отнести к средnezасоленным и слабосолонцеватым. При этом почвы в отдельных функциональных зонах по этим показателям отличаются достаточно сильно (табл. 4).

Москвы в связи с их засолением ПГР отражает карта антропогенной солонцеватости за 2010 г. (рис. 3). Карта позволяет проследить изменение антропогенной солонцеватости почв ВАО в зависимости от типа землепользования и источника солей, т.е. дорожной сети. Ее анализ показывает, что больше всего от вносимых реагентов страдают почвы вблизи крупных автомагистралей – ш. Энтузиастов и МКАД. В меньшей концентрации катион натрия присутствует в почвах вдоль внутриквартальных дорог, в жилых кварталах и в рекреационной зоне.

Максимально высокая солонцеватость (≥ 15 –20%) выявлена в почвах в северо-западной части округа (районы Соколиная гора, Перово) и на отдель-

Таблица 4

Содержание обменных катионов и степень солонцеватости в почвах разных функциональных зон ВАО Москвы (данные 2010 г.)

Функциональные зоны (число проб)	Показатели	Обменные катионы в ППК, смоль(экв)/кг почвы				Степень солонцеватости, %
		Ca	Mg	Na	K	
Крупные автомагистрали (10)	1	8,64	1,48	1,51	0,39	12,0
	2	0,94–13,8	0,05–2,46	0,33–2,95	0,07–0,77	6,64–20,14
Промышленная (7)	1	9,70	1,18	1,40	0,36	14,50
	2	5,48–15,5	0,82–1,54	0,11–2,84	0,22–0,55	1,32–22,15
Жилая застройка среднеэтажная (13)	1	9,38	1,48	0,70	0,34	5,99
	2	3,52–14,7	0,10–2,89	0,35–1,40	0,14–0,85	2,41–12,23
Жилая застройка повышенной этажности (5)	1	6,62	0,92	0,79	0,24	6,22
	2	4,19–14,3	0,51–1,72	0,30–1,65	0,18–0,28	2,05–11,07
Рекреационная (7)	1	8,27	1,07	0,18	0,41	2,16
	2	3,10–12,2	0,12–1,78	0,07–0,42	0,13–0,80	0,86–11,67
Усадебная застройка (6)	1	8,32	1,22	0,12	0,22	1,03
	2	5,24–16,8	0,58–2,91	0,09–0,17	0,12–0,36	0,55–1,71
Агроландшафты (4)	1	7,86	1,48	0,09	0,38	1,01
	2	6,56–8,58	1,07–1,65	0,05–0,12	0,24–0,57	0,71–1,60

Примечание. 1 – среднее, 2 – максимальное–минимальное значения.

Максимальное содержание обменного натрия приурочено к почвам промышленных зон и крупных автомагистралей, где солонцеватость (12,0–14,5%) соответствует средней степени. Вблизи МКАД выявлены морфологические признаки солонцеватости в почвенном профиле, проявляющиеся в формировании солонцового горизонта Bu_{1Na} , в котором содержание физической глины возрастает в 2–2,5 раза по сравнению с поверхностным слоем и почвообразующей породой и накапливается обменный натрий. Почвы жилой застройки средней и повышенной этажности слабосолонцеваты (6,0–6,2%). Самое низкое содержание обменного натрия и солонцеватость имеют почвы агроландшафтов, усадебной застройки (~1%) и рекреационной зоны (2,2%), которые отнесены к несолонцеватым.

Пространственную структуру загрязнения обменным натрием поверхностного слоя почв ВАО

на участках вблизи ш. Энтузиастов и МКАД. Большая часть почв транспортной зоны в центре ВАО имеет среднюю степень солонцеватости (10–15%), на небольших площадях встречаются несолонцеватые почвы (<5%), которые приурочены в основном к восточной части ВАО.

Формирование обширных ареалов антропогенно-засоленных и солонцеватых почв в ВАО (рис. 2, 3) объясняется широким разносом солей с латеральными потоками загрязненных снеговых вод и импультверизацией – их ветровым переносом от автомагистралей. При этом важную роль играет тип городской застройки. Так, селитебные кварталы с высокэтажной застройкой служат механическими барьерами для задержания солевых аэрозолей, уменьшая дальность их переноса и тем самым увеличивая аккумуляцию солей вблизи автомагистралей. Открытые пространства, напротив, способствуют

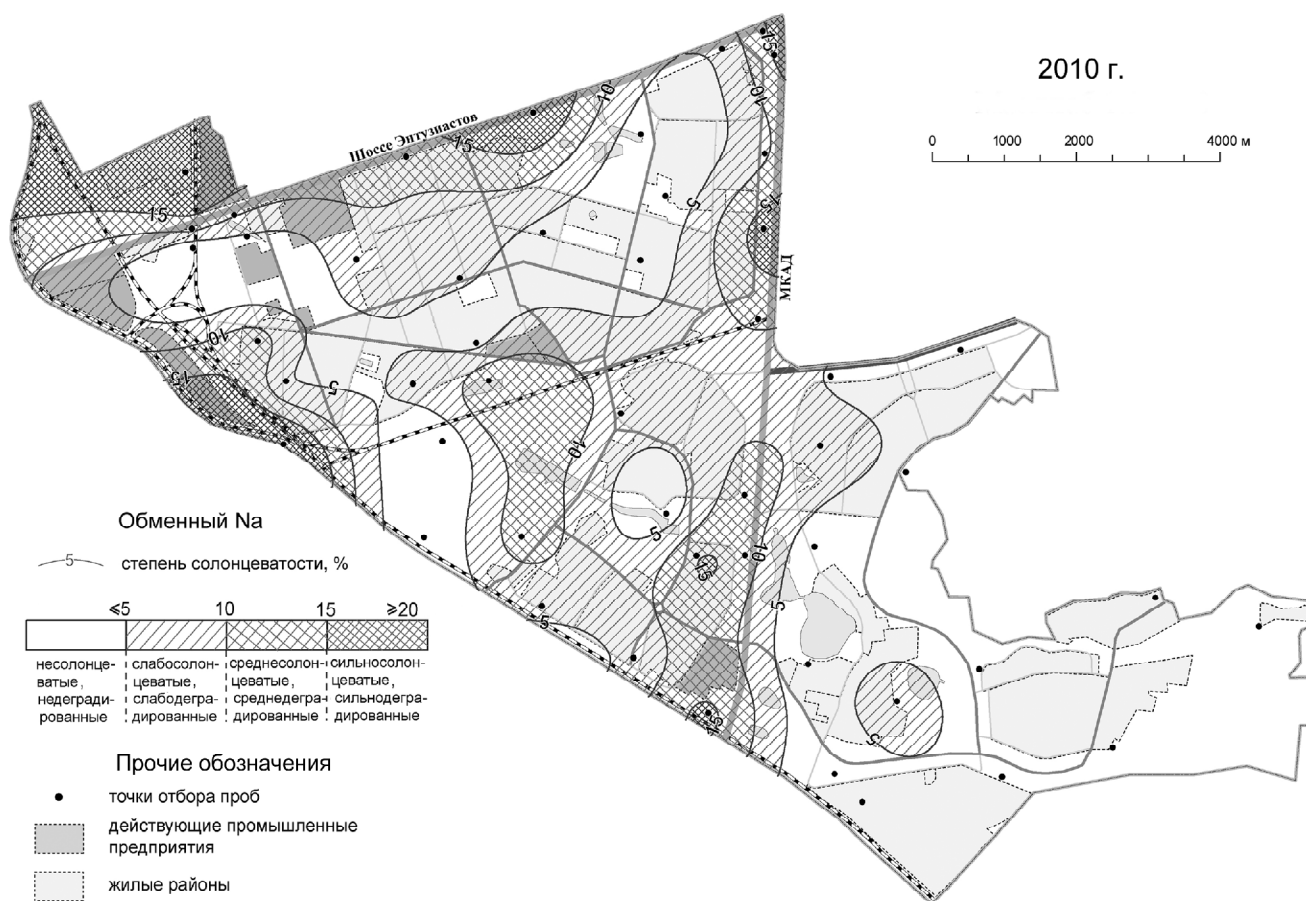


Рис. 3. Техногенные аномалии обменного натрия (в % солонцеватости) в поверхностном слое почв ВАО Москвы (по данным 2010 г.)

Fig. 3. Technogenic anomalies of exchangeable sodium (% of alkalinity) in the surface soil layer, Moscow EAD, 2010

ют рассеиванию солевых аэрозолей и их более широкому распространению по территории города.

Деградация почвенного покрова ВАО под воздействием антропогенной солонцеватости. Оценка выполнена по методике определения размеров ущерба от деградации почв [Методика..., 1994]. Под деградацией понимается ухудшение состава и свойств почв, что приводит к потере их природно-хозяйственной значимости. Среди основных типов деградации почв особо выделяется осолонцевание – приобретение почвой специфических свойств от вхождения ионов натрия в ППК. По уровню содержания обменного натрия в почвах и соответствующей ему солонцеватости (<5, 5–10, 10–15, 15–20% от емкости катионного обмена) выделены четыре степени их деградации: недеградированные, слабо-, средне- и сильнодеградированные. Они использованы при составлении карты техногенных аномалий обменного натрия в поверхностном слое почв ВАО и отражены в ее легенде (рис. 3).

В результате анализа карты (рис. 3) выявлена различная степень деградации почв. В 2010 г. 22,2% общей площади занимали сильно- и среднедеградированные почвы в транспортной и промышленной зонах. В центре округа наибольшее распространение получили слабодеградированные почвы, занимающие 32% территории. Площадь недеградированных почв составила 45,8%, они сохранились в

селитебной зоне южнее ш. Энтузиастов, в парке Кусково и на востоке округа за МКАД. Таким образом, в результате засоления почв ПГР и последующего развития в них солонцеватости произошла деградация почвенного покрова на 50% площади округа и больше. При существующем объеме применения ПГР в ближайшем будущем можно ожидать дальнейшее усиление солонцеватости в почвенном покрове ВАО. Концентрация обменного натрия в почвах может достичь столь высокого уровня, что почвы превратятся в солонцы, что потребует очень длительных сроков восстановления и реабилитации.

Выводы:

– многолетнее и интенсивное использование ПГР на дорогах Москвы привело к экологически опасным последствиям для исходно незасоленных почв – их антропогенной галогенизации и осолонцеванию, не характерных для гумидной зоны. В результате изменились химический состав и физико-химические свойства почв, включая реакцию среды, гранулометрический состав и плотность. Причиной развития засоления и солонцеватости почвенного покрова служат вносимые с ПГР хлоридно-натриевые соли и катион натрия, вызывающий диспергацию и пептизацию почвенных коллоидов, которые под влиянием электролитов солей коагулируют, увеличивая плотность почв и приводя к деградации почвенного покрова;

– поступление ПГР в снежный покров вызывает его подщелачивание с увеличением pH по сравнению с фоном в среднем на 0,6. Наиболее высокие значения pH (7,5) в снеге приурочены к промышленным зонам и автомагистралям. Средняя минерализация талой воды составляет 19,4 мг/л, что в 2 раза выше фона. По ионному составу снеговые воды относятся к хлоридно-натриевому и хлоридно-кальциевому типам, что объясняется влиянием солей NaCl и CaCl₂, доминирующим в составе ПГР;

– в городских почвах, наследующих химический состав снега, происходит трансформация их физико-химических свойств – они приобретают нейтральную реакцию (pH 7,2), повышенную в 16–20 раз относительно фона минерализацию (15,2 смоль(экв)/кг) и плотный остаток (0,48%). В составе почвенного раствора преобладают ионы хлора и натрия со значе-

ниями коэффициента накопления $K_c \sim 100$. По данным за 2010 г. большая часть городских почв имеет среднюю степень засоления и слабую степень солонцеватости;

– на картах засоления и солонцеватости почвенного покрова выделены техногенные аномалии легкорастворимых солей, приуроченные в основном к автомагистралям и промзонам. Процессы деградации почвенного покрова в результате засоления и солонцеватости затронули свыше 50% территории округа. В зависимости от солонцеватости выделены четыре категории деградированных почв, включая сильно- и среднедеградированные, которые занимают 22% территории ВАО. Высокие дозы применяемых ПГР обуславливают прогрессирующее засоление городских почв с усилением их солонцеватости.

Благодарности. Полевые и лабораторные исследования выполнены при поддержке Русского географического общества (договор № 07/2014-П1), анализ и интерпретация данных – за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-27-00083).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Герасимов А.О. Оценка токсичности новых противогололедных средств для высших растений // Экология и промышленность России. Анализ. Методики. Прогнозы. 2013. № 3. С. 58–62.
- Еремина И.Д., Григорьев А.В. Кислотность и химический состав снежного покрова в Москве и Подмосковье за период 1999–2006 гг. // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2010. № 3. С. 56–60.
- Засоленные почвы России / Под ред. Л.Л. Шишова, Е.И. Панковой. М.: ИКЦ «Академкнига», 2006. 854 с.
- Касимов Н.С. Методология и методика ландшафтно-геохимического анализа городов // Экогеохимия городских ландшафтов / Под ред. Н.С. Касимова. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1995. С. 6–39.
- Касимов Н.С., Кошелева Н.Е., Власов Д.В., Терская Е.В. Геохимия снежного покрова в Восточном округе Москвы // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2012. № 4. С. 14–25.
- Касимов Н.С., Никифорова Е.М. Геохимия городов и городских ландшафтов // Экология города / Под ред. А.С. Курбатовой и др. М.: Научный мир, 2004. С. 234–268.
- Кошелева Н.Е., Касимов Н.С., Никифорова Е.М. Современное эколого-геохимическое состояние почв Москвы // Экологические проблемы промышленных городов. Ч. 1. Саратов, 2011. С. 79–85.
- Кошелева Н.Е., Никифорова Е.М. Антропогенная трансформация физико-химических свойств городских почв и ее влияние на накопление свинца: Мат-лы II Междунар. науч. конф. «Современные проблемы загрязнения почв», 28 мая–1 июня 2007. М.: МГУ, 2007. С. 123–127.
- Лабутина И.А., Хайбрахманов Т.С. Функциональное зонирование территории ВАО г. Москвы для целей экологического мониторинга // ИнтерКарто/ИнтерГИС-16. Устойчивое развитие территорий: Теория ГИС и практический опыт: Мат-лы междунар. науч. конф. Ростов-на-Дону, 2010. С. 234–236.
- Методика определения размеров ущерба от деградации почв и земель // Препринт. Управление охраны почв и земельных ресурсов Минприроды России и Управление мониторинга земель и охраны почв Роскомзема. М., 1994. 13 с.
- Никифорова Е.М., Касимов Н.С., Кошелева Н.Е. Многолетняя динамика антропогенного засоления почв Москвы (на примере Восточного округа) // Почвоведение. 2014. № 3. С. 351–363.
- Николаев Л.Ф., Ойхели О.В., Поршалева Е.Б. и др. Противогололедные реагенты и их влияние на природную среду. М.: Диалог-МГУ, 1998. 60 с.
- Обухов А.И., Лепнева О.М. Экологические последствия применения противогололедных соединений на городских автомагистралях и меры по их устранению // Экологические исследования в Москве и Московской области: Мат-лы науч.-практ. конф. М., 1990. С. 197–202.
- Почва, город, экология / Под ред. Г.В. Добровольского. М.: Фонд «За экономическую грамотность», 1997. 320 с.
- Прокофьева Т.В., Мартыненко И.А., Иванников Ф.А. Систематика почв и почвообразующих пород Москвы и возможность их включения в общую классификацию // Почвоведение. 2011. № 5. С. 611–623.
- Систер В.Г., Корецкий В.Е. Инженерно-экологическая защита водной системы северного мегаполиса в зимний период. М.: Центр МГУИЭ, 2004. 159 с.
- Смагин А.В., Азовцева Н.А., Смагина М.В. и др. Некоторые критерии и методы оценки экологического состояния почв в связи с озеленением городских территорий // Почвоведение. 2006. № 5. С. 603–615.
- Хомяков Д.М. Противогололедные реагенты на объектах дорожного хозяйства Москвы. Опыт прошедшего десятилетия // Дорожная держава. 2013. № 47. С. 92–96.
- Черноусенко Г.И., Ямнова И.А., Скрипникова М.Н. Антропогенное засоление почв Москвы // Почвоведение. 2003. № 1. С. 97–105.
- Шевякова Н.И., Кузнецов В.В., Карпачевский Л.О. Причины и механизмы гибели зеленых насаждений при действии техногенных факторов городской среды и создание стресс-устойчивых фитоценозов // Лесной вестник. 2009. № 6 (15). С. 25–33.
- Amrhein C., Strong J.E., Mosher P.A. Effect of deicing salts on metal and organic matter mobilization in roadside soils // Environ. Sci. Technol. 1992. Vol. 26. P. 703–709.
- Bäckström M., Karlsson S., Bäckman L. et al. Mobilisation of heavy metals by deicing salts in a roadside environment // Water Res. 2004. Vol. 38. P. 720–732.
- Brady C.B., Weil R.R. The Nature and Properties of Soils. 11th ed. L.: Prentice Hall Intern. Editions, 1996. 739 p.
- Bryson G.M., Barker A.V. Sodium accumulation in soils and plants along Massachusetts roadsides // Commun. Soil Sci. Plant Anal. 2002. Vol. 33(1–2). P. 67–78.

Czerniawska-Kusza I., Kusza G., Duzynski M. Effect of deicing salts on urban soils and health status of roadside trees in the Opole region // *Environ Toxicol.* 2004. Vol. 19(4). P. 296–301.

Joutti A., Schultz E., Pessala P. et al. Ecotoxicity of Alternative de-icers // *J. Soils & Sediments.* 2003. Vol. 3(4). P. 269–272.

Kim S.-Y., Koretsky C. Effects of road salt deicers on sediment biogeochemistry // *Biogeochemistry.* 2013. Vol. 112(1–3). P. 343–358. DOI: 10.1007/s10533-012-9728-x.

Li F., Zhang Y., Fan Z., Oh K. Accumulation of de-icing salts and its short-term effect on metal mobility in urban roadside soils // *Bull. Environ. Contamination and Toxicology.* 2015. Vol. 94(4). P. 525–531. DOI: 10.1007/s00128-015-1481-0.

Nelson S.S., Yonge D.R., Barber M.E. Effects of road salts on heavy metal mobility in two eastern Washington soils // *J. Environ. Eng.* 2009. Vol. 135(7). P. 505–510. DOI: 10.1061//asce/0733-9372/2009/135:7/505.

Norrström A.-C., Bergstedt B. The impact of road de-icing salts (NaCl) on colloid dispersion and base cation pools in roadside soils // *Water Air Soil Pollut.* 2001. Vol. 127. P. 281–299.

Ramakrishna D., Viraraghavan T. Environmental impact of chemical deicers – a review // *Water Air Soil Pollut.* 2005. Vol. 166. P. 49–63.

Shainberg I., Letey J. Response of soils to sodic and saline conditions // *Hilgardia.* 1984. Vol. 52. N 2. P. 1–57. DOI: 10.3733/hilg.v52n02p057.

Поступила в редакцию 08.10.2015

Принята к публикации 16.03.2016

E.M. Nikiforova¹, N.E. Kosheleva², T.S. Khaibrakhmanov³

ECOLOGICAL IMPACT OF ANTIGLAZE TREATMENT ON SOILS OF THE EASTERN DISTRICT OF MOSCOW

The environmental consequences of long-term use of de-icing salts (DS) in the Eastern Administrative District (EAD) of Moscow manifest themselves as anthropogenic salinity and alkalinity of soils. Chemical composition of reagents, levels and distribution patterns of soluble salts and exchangeable cations in snow meltwater and soils were described for different land-use zones. Mixtures of DS salts based on sodium chloride and sodium cause salinization and alkalization of soils. These salts produce dispersion and peptization of soil colloids, which coagulate under the influence of salt electrolytes, thus increasing soil density. Alkalization of snow cover in EAD is characterized by an average increase in pH compared to the background level by 0,6 units. The average salinity of meltwater is 19,4 mg/l, which is 2 times higher than the background values. According to the ion composition, snow waters belong to sodium chloride and calcium chloride classes due to the influence of the DS main salt compounds – NaCl and CaCl₂.

Inheriting the chemical composition of snow, urban soils acquired a neutral reaction (average pH 7,2), mineralization (15,2 cmol-eq/kg) and the solid residue (0,48%) which is 20–16 times higher than the background level. Ions of Cl and Na with enrichment factor about 100 prevail in the soil solution. According to the data of 2010, most urban soils had an average salinity and low degree of alkalinity. Extensive and contrasting technogenic anomalies of salts and exchangeable Na formed in the soil cover. Soils of traffic and industrial zones demonstrated the highest degree of salinity with NaCl and CaCl₂ (up to 1,3–1,6% of solid residue) and alkalinity (up to 12–14,5% of the cation sum). Maps of soluble salts and exchangeable sodium content in the surface soil layer compiled for the EAD territory showed the extent of soil degradation as a result of its anthropogenic alkalinity. Degradation processes have affected more than 50% of the area. Soils near highways with a total area of 22,2% were assigned to the category of strongly and moderately degraded soils. Slightly degraded soils, which occupy 32% of the territory, remained in the center of the district. Non-degraded soils with an area of 45,8% are located in the residential area southward from the Enthusiasts' highway, in park Kuskovo, as well as in the eastern part of the district located outside the Moscow automobile ring road.

Keywords: urban soils, de-icing salts, salinization, alkalinity, technogenic anomalies, Moscow.

Acknowledgements. The study was financially supported by the Russian Geographical Society (project N 07/2014-III) and the Russian Science Foundation (project N 14-27-00083).

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Landscape Geochemistry and Soil Geography, Senior Research Scientist, PhD in Geography; *e-mail:* nikiforova-geo@mail.ru

² Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography Department of Landscape Geochemistry and Soil Geography, Leading Research Scientist, D.Sc. in Geography; *e-mail:* nataalk@mail.ru

³ «Scanex» Engineering and Technological Centre, Project Leader, PhD in Geography; *e-mail:* haibrahmanov@scanex.ru

REFERENCES

- Amrhein C., Strong J.E., Mosher P.A.* Effect of deicing salts on metal and organic matter mobilization in roadside soils // *Environ. Sci. Technol.* 1992. Vol. 26. P. 703–709.
- Bäckström M., Karlsson S., Bäckman L.* et al. Mobilisation of heavy metals by deicing salts in a roadside environment // *Water Res.* 2004. Vol. 38. P. 720–732.
- Brady C.B., Weil R.R.* The Nature and Properties of Soils, 11th ed., London, Prentice Hall International Editions, 1996, 739 p.
- Bryson G.M., Barker A.V.* Sodium accumulation in soils and plants along Massachusetts roadsides // *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 2002. Vol. 33(1–2). P. 67–78.
- Chernousenko G.I., Jamnova I.A., Skripnikova M.N.* Antropogennoe zasolenie pochv Moskvy // *Pochvovedenie*. 2003. N 1. P. 97–105 (in Russian).
- Czerniawska-Kusza I., Kusza G., Duzynski M.* Effect of deicing salts on urban soils and health status of roadside trees in the Opole region // *Environ Toxicol.* 2004. Vol. 19(4). P. 296–301.
- Eremina I.D., Grigor'ev A.V.* Kislotsnost' i himicheskij sostav snezhnogo pokrova v Moskve i Podmoskov'e za period 1999–2006 gg. // *Vest. Mosk. un-ta. Ser. 5. Geografija*. 2010. N 3. P. 56–60 (in Russian).
- Gerasimov A.O.* Ocenka toksichnosti novyh protivogolodnyh sredstv dlja vysshih rastenij // *Jekologija i promyshlennost' Rossii. Analiz. Metodiki. Prognozy*. 2013. N 3. P. 58–62 (in Russian).
- Homjakov D.M.* Protivogolodnye reagenty na ob'ektah dorozhnogo hozjajstva Moskvy. Opyt proshedshego desjatiletija // *Dorozhnaja derzhava*. 2013. № 47. P. 92–96 (in Russian).
- Joutti A., Schultz E., Pessala P.* et al. Ecotoxicity of Alternative de-icers // *J. Soils & Sediments*. 2003. Vol. 3(4). P. 269–272.
- Kasimov N.S.* Metodologija i metodika landshaftno-geohimicheskogo analiza gorodov // *Jekogeohimija gorodskih landshaftev* / Pod red. N.S. Kasimova. M.: Izd-vo Mosk. Un-ta, 1995. P. 6–39 (in Russian).
- Kasimov N.S., Kosheleva N.E., Vlasov D.V., Terskaja E.V.* Geohimija snezhnogo pokrova v Vostochnom okruge Moskvy // *Vestn. Mosk. un-ta. Ser. Geografija*. 2012. № 4. P. 14–25 (in Russian).
- Kasimov N.S., Nikiforova E.M.* Geohimija gorodov i gorodskih landshaftov / *Jekologija goroda* / Pod red. A.S. Kurbatovoj i dr. M.: Nauchnyj mir, 2004. P. 234–268 (in Russian).
- Kim S.-Y., Koretsky C.* Effects of road salt deicers on sediment biogeochemistry // *Biogeochemistry*. 2013. Vol. 112(1–3). P. 343–358. DOI: 10.1007/s10533-012-9728-x.
- Kosheleva N.E., Kasimov N.S., Nikiforova E.M.* Sovremennoe jekologo-geohimicheskoe sostojanie pochv Moskvy // *Jekologicheskie problemy promyshlennyh gorodov*. Ch. 1. Saratov, 2011. P. 79–85 (in Russian).
- Kosheleva N.E., Nikiforova E.M.* Antropogennaja transformacija fiziko-himicheskikh svojstv gorodskih pochv i ee vlijanie na nakoplenie svinca: Mat-ly II Mezhdunar. Nauchn. konf. «Sovremennye problemy zagriznenija pochv», 28 maja–1 ijunja 2007. M.: MGU, 2007. P. 123–127 (in Russian).
- Labutina I.A., Hajbrahmanov T.S.* Funkcional'noe zonirovanie territorij VAO g. Moskvy dlja celej jekologicheskogo monitoringa // *InterKarto/InterGIS-16. Ustojchivoe razvitie territorij: teorija GIS i prakticheskij opyt: Mat-ly mezhdunar. Nauchn. konf. Rostov-na-Donu*, 2010. P. 234–236 (in Russian).
- Li F., Zhang Y., Fan Z., Oh K.* Accumulation of de-icing salts and its short-term effect on metal mobility in urban roadside soils // *Bull. Environm. Contamination and Toxicology*. 2015. Vol. 94 (4). P. 525–531. DOI: 10.1007/s00128-015-1481-0.
- Metodika opredelenija razmerov ushherba ot degradacii pochv i zemel' // Preprint. Upr. ohrany pochv i zemel'nyh resursov Minprirody Rossii i Upr. monitoringa zemel' i ohrany pochv Roskomzema. M., 1994, 13 p. (in Russian).*
- Nelson S.S., Yonge D.R., Barber M.E.* Effects of road salts on heavy metal mobility in two eastern Washington soils // *J Environ Eng.* 2009. Vol. 135(7). P. 505–510. DOI: 10.1061//asce/0733-9372/2009/135/7/505.
- Nikiforova E.M., Kasimov N.S., Kosheleva N.E.* Mnogoletnjaja dinamika antropogennogo zasolenija pochv Moskvy (na primere Vostochnogo okruga) // *Pochvovedenie*. 2014. N 3. P. 351–363 (in Russian).
- Nikolaev L.F., Ocheli O.V., Porshaleva E.B.* i dr. Protivogolodnye reagenty i ih vlijanie na prirodnuju sredu. M.: Dialog-MGU, 1998, 60 p. (in Russian).
- Norrström A.-C., Bergstedt B.* The impact of road de-icing salts (NaCl) on colloid dispersion and base cation pools in roadside soils // *Water Air Soil Pollut.* 2001. Vol. 127. P. 281–299.
- Obuhov A.I., Lepneva O.M.* Jekologicheskie posledstvija primenenija protivogolodnyh soedinenij na gorodskih avtomagistraljah i mery po ih ustraneniu // *Jekologicheskie issledovanija v Moskve i Moskovskoj oblasti: Mat-ly nauch.-prakt. konf. M., 1990. P. 197–202 (in Russian).*
- Pochva, gorod, jekologija* / Pod red. G.V. Dobrovol'skogo. Moscow, Fond «Za jekonomicheskiju gramotnost'», 1997, 320 p. (in Russian).
- Prokof'eva T.V., Martynenko I.A., Ivannikov F.A.* Sistematika pochv i pochvoobrazujushchih porod Moskvy i vozmozhnost' ih vkljuchenija v obshhuju klassifikaciju // *Pochvovedenie*. 2011. N 5. P. 611–623 (in Russian).
- Ramakrishna D., Viraraghavan T.* Environmental impact of chemical deicers – a review // *Water Air Soil Pollut.* 2005. Vol. 166. P. 49–63.
- Shainberg I., Letey J.* Response of soils to sodic and saline conditions // *Hilgardia*. 1984. Vol. 52. N 2. P. 1–57. DOI: 10.3733/hilg.v52n02p057.
- Shevjakova N.I., Kuznecov V.V., Karpachevskij L.O.* Prichiny i mehanizmy gibeli zelenyh nasazhdenij pri dejstvii tehnogennyh faktorov gorodskoj sredy i sozdanie stress-ustojchivyh fitocenozov // *Lesnoj vestnik*. 2009. N 6 (15). P. 25–33 (in Russian).
- Sister V.G., Koreckij V.E.* Inzhenerno-jekologicheskaja zashhita vodnoj sistemy severnogo megapolisa v zimnij period. M.: Centr MGUIJe, 2004, 159 p. (in Russian).
- Smagin A.V., Azovceva N.A., Smagina M.V.* i dr. Nekotorye kriterii i metody ocenki jekologicheskogo sostojanija pochv v svjazi s ozelenenijem gorodskih territorij // *Pochvovedenie*. 2006. N 5. P. 603–615 (in Russian).
- Zasolennye pochvy Rossii* / Pod red. L.L. Shishova, E.I. Pankovoj. M.: IKC «Akademkniga». 2006, 854 p. (in Russian).

Received 08.10.2015

Accepted 16.03.2016

УДК 504.054; 550.46; 550.47; 631.416.9

Д.В. Власов¹, Н.С. Касимов²

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ АНОМАЛИИ МЕТАЛЛОВ И МЕТАЛЛОИДОВ В КОМПОНЕНТАХ ЛАНДШАФТОВ В ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ МОСКВЫ: ПАРАГЕНЕЗИСЫ ЭЛЕМЕНТОВ И ТИПОЛОГИЯ

Выполнена эколого-геохимическая оценка аномалий металлов и металлоидов в ландшафтах южной части Восточного округа Москвы на основе сравнения техногенной геохимической специализации различных сред (снежный покров, дорожная пыль, поверхностные горизонты почв, листья клена платановидного и одуванчика лекарственного). Для оценки вклада компонентов ландшафта в общую геохимическую аномальность территории предложено создавать эколого-геохимические портреты, представляющие сумму значений коэффициентов концентрации поллютантов в отдельных компонентах. Приоритетные загрязнители ландшафтов в восточной части Москвы – Cd, As, Pb, Mo, Sb. Выявлены атмогеохимический (Sb, Mo, Sn, Ag, W, As), педогеохимический (Sb, Cd, Zn, Pb, Fe, As) и смешанный (Cd, Sb, Pb, Mo) парагенезисы элементов в сопряженных транзитных и депонирующих средах. С использованием системы интегральных показателей предложена типология техногенных геохимических аномалий, включающая прогрессивные, неопрогрессивные, биопротрессивные, устойчивые, регрессивные, реликтовые и биоаккумулятивные аномалии. Устойчивые аномалии поллютантов с наименее благополучной экологической ситуацией расположены в северо-западной, северо-восточной, центральной и юго-восточной частях исследованной территории рядом с крупными автомобильными дорогами и промышленными зонами.

Ключевые слова: техногенез, биогеохимия, дорожная пыль, экогеохимия, типология аномалий, снег, городские почвы, городские растения.

Введение. Проблемам техногенеза и геохимическим аспектам экологической оценки ландшафтов посвящены многие работы А.И. Перельмана о техногенной миграции химических элементов, технофильности, техногенных геохимических барьерах, полезных и вредных техногенных геохимических аномалиях, геохимических принципах эколого-географической систематики городов и городских ландшафтов [Перельман, Касимов, 1999].

Наиболее сильно техногенное воздействие на природную среду и население проявляется в промышленных городах, которые по интенсивности загрязнения и площади аномалий поллютантов представляют техногенные геохимические и биогеохимические провинции широкого круга химических элементов [Экогеохимия..., 1995]. Москва среди крупных индустриальных центров страны – один из самых загрязненных городов, в ее восточной части расположены десятки предприятий разных отраслей, которые наряду с транспортом служат главными источниками техногенного воздействия.

Комплексные геохимические исследования в восточной части Москвы, выбранной как пример промышленной части города, начаты еще в 1980-х гг. Е.М. Никифоровой [Экогеохимия..., 1995] и продолжают в настоящее время в южной части Восточного административного округа (ВАО) г. Москвы в муниципальных районах Соколиная гора, Перово, Ивановское, Новогиреево, Вешняки, Новокосино и

Косино-Ухтомский. Более чем за 20 лет накоплен значительный статистический материал и исследованы особенности миграции и многолетняя динамика накопления ряда металлов и металлоидов в разных компонентах ландшафтов и функциональных зонах округа [Регионы..., 2014].

К главным итогам эколого-геохимического анализа городских ландшафтов относятся оценка контрастности и выявление характера пространственного распределения техногенных аномалий поллютантов. В России широко используются суммарные показатели загрязнения (Z_c) почв и снежного покрова металлами и металлоидами [Геохимия..., 1990]. Для оценки эколого-геохимического состояния городских ландшафтов в южной части ВАО нами расширен перечень анализируемых показателей, обобщены данные о распределении моноэлементных и полиэлементных коэффициентов, что позволило выделить парагенезисы ряда металлов и металлоидов, подробно охарактеризовать и типизировать техногенные геохимические аномалии поллютантов в ландшафтах восточной части Москвы.

Цель работы – на основе теории и методологии геохимии ландшафтов выявить техногенные геохимические аномалии металлов и металлоидов в компонентах ландшафтов этой территории, для чего решались следующие задачи:

– установление геохимической специализации компонентов городских ландшафтов с выявлением аномалий отдельных химических элементов;

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра геохимии ландшафтов и географии почв, науч. с., канд. геогр. н.; e-mail: vlasgeo@yandex.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, заведующий кафедрой геохимии ландшафтов и географии почв, профессор, академик РАН; e-mail: secretary@geogr.msu.ru

– определение парагенезисов металлов и металлоидов в компонентах ландшафтов;
– разработка типологии техногенных геохимических аномалий поллютантов для прогнозирования трендов загрязнения городской среды.

Материалы и методы исследований. Основной источник загрязнения городских ландшафтов ВАО – автотранспорт, поставляющий около 80% суммарных выбросов, что несколько меньше по сравнению с их средним количеством в Москве (92%) [Доклад..., 2014]. Стационарные источники техногенного воздействия сосредоточены в ряде промышленных зон: Соколиная гора, Прожектор, Перово, Руднево, Косино-1 и Косино-2 (рис. 1).

леенные, глеевые и заболоченные разности; на пойме р. Рудневки – аллювиальные и перегнойно-торфяные почвы; в постагрогенной зоне – постагрогенные агроземы и агродерново-подзолистые реградированные почвы [Большой..., 2012; Власов, 2015].

На полевом этапе отобрана 51 проба снега, 16 – дорожной пыли, 73 – почв, 49 – листьев одуванчика лекарственного (*Taraxacum officinale*), 26 – листьев клена платановидного (*Acer platanoides*) (рис. 1). Для характеристики региональных ландшафтно-геохимических условий использовались фоновые пробы снега и растений (по 5), отобранные в 45–50 км на запад от Москвы, недалеко от городов Голицыно

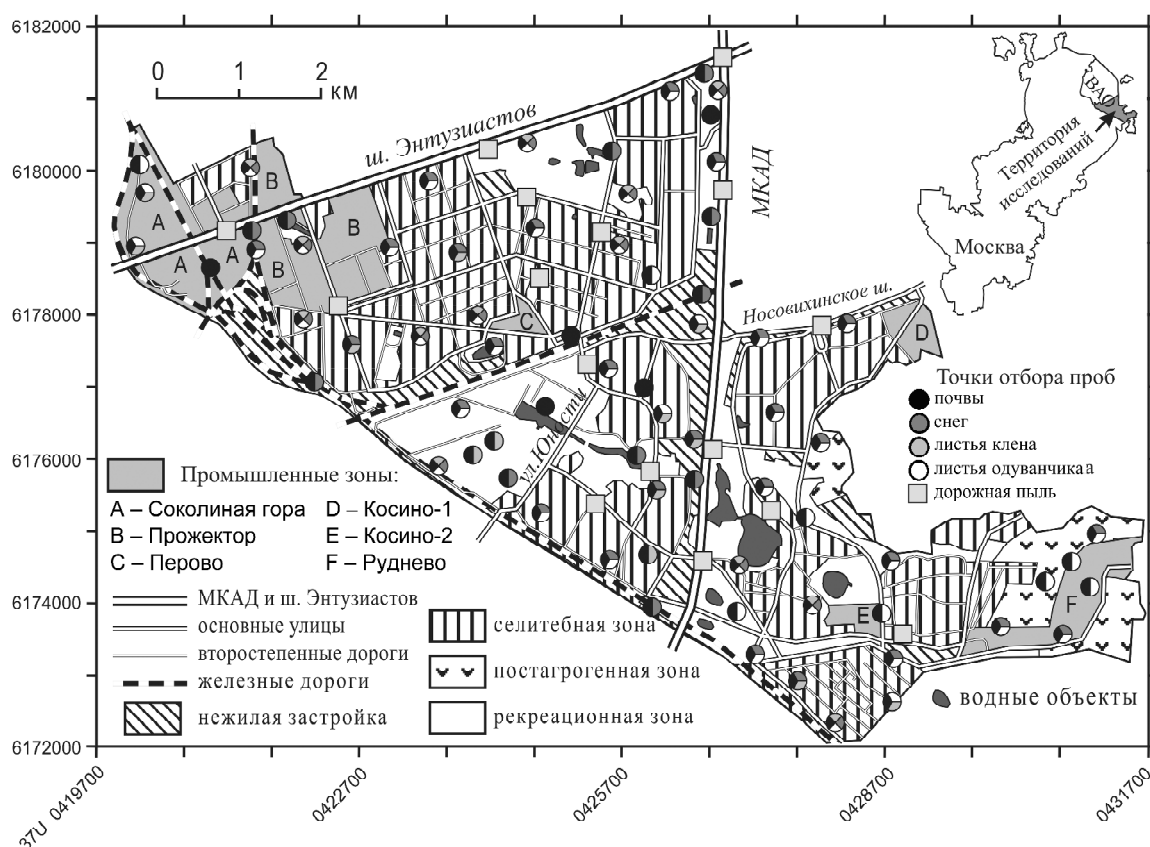


Рис. 1. Промышленные зоны и точки опробования компонентов городских ландшафтов в восточной части Москвы. Система координат UTM

Fig. 1. Industrial zones and sampling sites for components of urban landscapes in the Eastern part of Moscow. Applied system of coordinates is UTM

Территория расположена в краевой части Мещерской слаборасчлененной заболоченной озерно-ледниковой равнины с общим уклоном на юго-восток и относительно большой мощностью четвертичных водно-ледниковых, аллювиальных и техногенных отложений [Большой..., 2012]. Среди древесных пород наиболее распространены клен и липа [Доклад..., 2014]. Почвенный покров представлен нейтральными, местами щелочными (рН до 7,2–8,5), преимущественно супесчаными и песчаными антропогенными урбаноземами, экраноземами, реплантоземами и рекреаземами. В рекреационной зоне развиты дерново-подзолистые и дерново-урбоподзолистые почвы, а также их ог-

и Звенигород с минимальным аэротехногенным влиянием столицы, и 10 проб фоновых дерново-подзолистых почв из природного парка Мещера во Владимирской области приблизительно на 150 км восточнее Москвы на сходных с городскими почвами породах – песках, супесях и легких суглинках. Из-за существенных различий в оценках кларков элементов в верхней части континентальной земной коры [Касимов, Власов, 2015] для дорожной пыли в качестве эталона сравнения для Ag, Cd и Mo использованы их кларки из работы [Rudnick, Gao, 2003], для Bi, Co, Cu и V – из [Hu, Gao, 2008], для Sn – из [Wedepohl, 1995] и для As, Be, Cr, Fe, Mn, Ni, Pb, Sb, Sr, Ti, W и Zn – из [Григорьев, 2009].

В пылевой составляющей снега, почвах и дорожной пыли определено содержание Ag, As, Be, Bi, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Mo, Ni, Pb, Sb, Sn, Sr, Ti, V, W, Zn масс-спектральным и атомно-эмиссионным методами во ВНИИ минерального сырья имени Н.М. Федоровского (ВИМС); As, Cd, Cu, Fe, Mn, Mo, Pb, Sb, Zn в растворах мокрого озонления растений – методом атомной абсорбции в Эколого-геохимическом центре географического факультета МГУ (аналитики Е.В. Терская, Л.В. Добрыднева).

При обработке полученных данных для компонентов городского ландшафта использованы следующие показатели:

коэффициент рассеяния элемента в растениях, n_2 – число элементов с $K_p > 1$ [Сорокина, 2013];

для всех компонентов (кроме дорожной пыли) – коэффициент концентрации – $K_c = C / C_{\phi}$, где C и C_{ϕ} – содержание элементов в пробах на территории города и в фоновых условиях соответственно [Геохимия..., 1990].

Критерии для выделения геохимических аномалий с оценкой степени экологической опасности загрязнения ландшафтов металлами и металлоидами – уровни интегральных показателей (табл. 1). Карты распределения суммарных показателей построены в Surfer 10 методом кригинга.

Таблица 1

Критерии для выделения техногенных геохимических аномалий в городских ландшафтах, по [Методические..., 2006; Касимов и др., 2012; Власов, 2015]

Уровень интегральных показателей и экологической опасности	Выпадение металлов и металлоидов, Z_d	Обогащение дорожной пыли металлами и металлоидами, Z_e	Загрязнение металлами и металлоидами, Z_c		Трансформация состава растений, Z_v	
			снег	почвы, растения	клен	одуванчик
Низкий, неопасный	<1000	<32	<32	<16	<15	<25
Средний, умеренно-опасный	1000–2000	32–64	32–64	16–32	15–25	25–35
Высокий, опасный	2000–4000	64–128	64–128	32–64	25–35	35–45
Очень высокий, очень опасный	4000–8000	128–256	128–256	64–128	35–45	45–55
Максимальный, чрезвычайно опасный	>8000	>256	>256	>128	>45	>55

для снежного покрова – *суточная пылевая нагрузка* (P_n , кг/км² в сутки): $P_n = m / (nl \cdot 2 \cdot 10^{-9})$, где m – масса взвеси в снеге, кг; n – число отобранных проб снега, l – число дней снегостава; $2 \cdot 10^{-9}$ – площадь сечения трубы, км²; *иммиссия химических элементов* (D , мг/км² в сутки): $D = P_n \cdot C$, где C – концентрация элемента во взвеси, мг/кг; *коэффициент превышения выпадений над фоном* – $K_d = D/D_{\phi}$; *суммарный показатель иммиссии* – $Z_d = \sum K_d - (n - 1)$, где n – число элементов с $K_d > 1,5$ [Касимов и др., 2012];

для снега и почв – *суммарный показатель загрязнения химическими элементами* – $Z_c = \sum K_c - (n - 1)$, где n – число элементов с $K_c > 1,5$ [Геохимия..., 1990];

для дорожной пыли – *кларк концентрации* $KK = C / K$, где C – содержание металла или металлоида в дорожной пыли, мг/кг, K – кларк элемента в верхней части континентальной коры, мг/кг; *коэффициент обогащения* $K_e = (C / C_{\text{норм}})_{\text{проба}} / (C / C_{\text{норм}})_{\text{земн. кора}}$, где C и $C_{\text{норм}}$ – содержание исследуемого и нормирующего (в данном случае – La) элементов в пробе или в земной коре соответственно; *суммарное обогащение* Z_e дорожной пыли поллютантами – $Z_e = \sum K_e - (n - 1)$ при $K_e > 1$, где n – число элементов с $K_e > 1$ [Власов и др., 2015];

для растений – *показатель биогеохимической трансформации* – $Z_v = \sum K_c + \sum K_p - (n_1 + n_2 - 1)$, где K_c – коэффициент концентраций элемента в растениях, n_1 – число элементов с $K_c > 1$, K_p – коэффи-

Результаты исследований и их обсуждение.
Геохимическая специализация аномалий в компонентах ландшафтов в восточной части Москвы. Интенсивное техногенное воздействие транспорта и промышленных объектов приводит к трансформации физико-химических свойств компонентов ландшафтов [Власов, 2015] и формированию техногенных геохимических аномалий поллютантов разной контрастности, которая в экогеохимии чаще всего определяется величиной коэффициента концентрации отдельных элементов (K_c) или суммарных поллюментных показателей.

Техногенные аномалии в компонентах ландшафтов в восточной части Москвы имеют разную геохимическую специализацию (табл. 2), обусловленную миграцией поллютантов, наличием или отсутствием геохимических барьеров, характером и особенностями техногенных источников загрязнения, длительностью экспонирования отдельных компонентов (приводятся поллютанты с K_c или $KK > 3$, элементы указаны в порядке уменьшения аномальности, в скобках – слабонакапливающиеся):

- снеговая пыль – Mo, Ag (Sb, As, W, Sn);
- дорожная пыль – Cd, Sb (Sn, Zn, Cu, Mo, Pb);
- почвы, поверхностные горизонты – Cd, W (Bi, Zn, Sb, Pb, Ag, As, Cr, Fe);
- одуванчик, листья – Mo (Pb, Cd, Fe, As);
- клен, листья – Sb (As).

Аниогенный Mo, подвижность которого в щелочных условиях выше, чем в кислых, при вы-

Таблица 2

Специализация техногенных геохимических аномалий в компонентах ландшафтов восточной части Москвы

Компонент	Объект	K_c и KK				Источник
		> 20	20–10	10–5	5–3	
Снег	Пылевая составляющая	–	Mo ₁₉	Ag ₆	Sb ₅ As ₅ W ₄ Sn ₄	[Касимов и др., 2012]
Дорожная пыль	Пыль в целом	–	–	Cd ₇ Sb ₆	Sn ₄ Zn ₄ Cu ₃ Mo ₃ Pb ₃	[Власов и др., 2015]
Почвы	Поверхностные горизонты	–	–	Cd ₈ W ₇	Bi ₅ Zn ₅ Sb ₅ Pb ₄ Ag ₄ As ₄ Cr ₄ Fe ₄	[Власов, 2015]
Растительность	Листья одуванчика	–	Mo ₁₃	–	Pb ₅ Cd ₄ Fe ₄ As ₄	[Vlasov, Kasimov, 2015]
	Листья клена	–	–	Sb _{9,7}	As ₅	

Примечание. Для дорожной пыли использованы значения KK , для остальных компонентов – K_c ; в индексах – величины KK или K_c ; прочерк – показатель в данной градации отсутствует.

падении на поверхность слабощелочных почв практически не накапливается, включаясь в биологический круговорот и поглощаясь растениями, в которых значение K_c этого металла также относительно высокое.

Sn, Ag, V и Sr слабоподвижны, поэтому для них величина K_c в поверхностном горизонте городских почв близка к величине K_c в пылевой составляющей снега или дорожной пыли. Схожий характер распределения между компонентами имеют также W, Bi, Zn, Cr, Ni, Co и Mn, однако значения их K_c в почвах несколько выше, чем в снеговой и дорожной пыли, что указывает на поступление этих элементов с выбросами разных отраслей промышленности и транспорта и техногенное обогащение поллютантами атмосферных выпадений. Be и Ti, напротив, практически не содержатся в выпадениях, поэтому их содержание в городских почвах близко к фоновому уровню.

Элементы Sb, Cd, As, Pb и Cu поступают в городские ландшафты с выбросами промышленных объектов и транспорта, мигрируют воздушным путем, выпадают и частично накапливаются в поверхностных горизонтах почв, включаясь в биологический круговорот и аккумулируясь в городской растительности.

Эколого-геохимический портрет территории. Для выявления контрастности аномалий металлов и металлоидов в ландшафте в целом и для оценки вклада его отдельных компонентов в общую аномальность составлен *эколого-геохимический портрет территории*, отражающий приоритетные загрязнители территории и представляющий сумму значений коэффициента концентрации элементов в разных компонентах (рис. 2). Этот показатель схож с другими аддитивными коэффициентами, широко

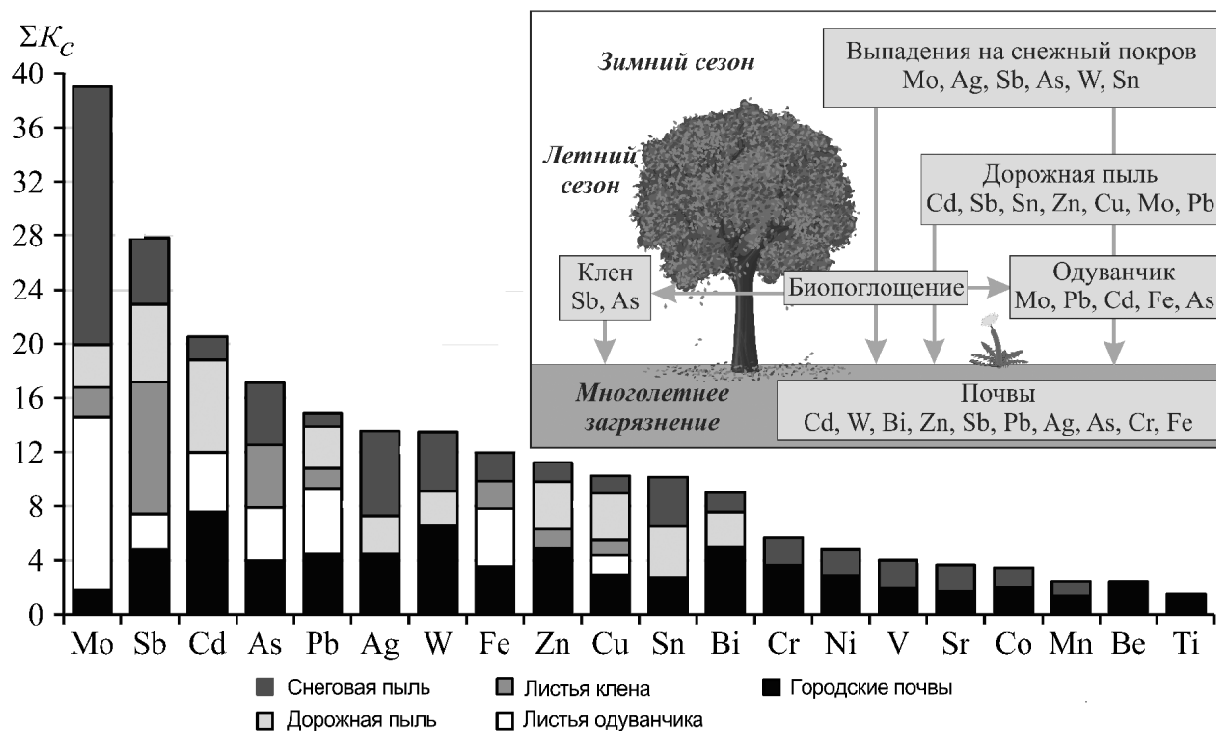


Рис. 2. Эколого-геохимический портрет ландшафта восточной части Москвы. Для дорожной пыли приведены значения KK элементов, для остальных компонентов – K_c

Fig. 2. Ecological-geochemical portrait of landscape, Eastern part of Moscow. For road dust, KK element values are shown, for the rest components – K_c values

применяемыми в качестве нормированных информационных показателей в поисковой геохимии [Матвеев, Соловов, 2011], а также в геохимии окружающей среды, например при расчете кларков биосферы и ноосферы [Глазовский, 1982].

Наибольшее накопление ($\Sigma K_c \geq 15$) характерно для Cd, As и Pb (I класс опасности в почвах), а также для Mo и Sb (II класс). Менее интенсивно ($\Sigma K_c = 9 \div 15$) аккумулируются экологически опасные Zn (I класс), Cu (II) и W (III), а также Ag, Fe, Sn и Bi (без класса опасности). При этом аномалии Mo, например, характерны в основном для снежного покрова и растений; Ag и W – для снежного покрова и почв, а Cd – для дорожной пыли и почв. Для сравнения такие портреты методически удобно строить и для других городов и регионов, а также не только для металлов, но и для других неорганических и органических загрязнителей.

Парагенезисы металлов и металлоидов в компонентах ландшафтов. Основная задача изучения геохимических аномалий в городских ландшафтах – выявление источников металлов и металлоидов с определением связи между компонентами, которая решается путем сравнительного анализа геохимической специализации пылевой составляющей снега, дорожной пыли, поверхностных горизонтов почв и растительности и выделения геохимических парагенезисов загрязнителей в подсистемах ландшафта, т.е. в сопряженных транзитных и депонирующих компонентах (рис. 3). Такие парагенезисы показывают генетическую близость накопления тех или иных химических элементов компонентами ландшафтов, а также основные пути их поступления и миграции в городских ландшафтах.

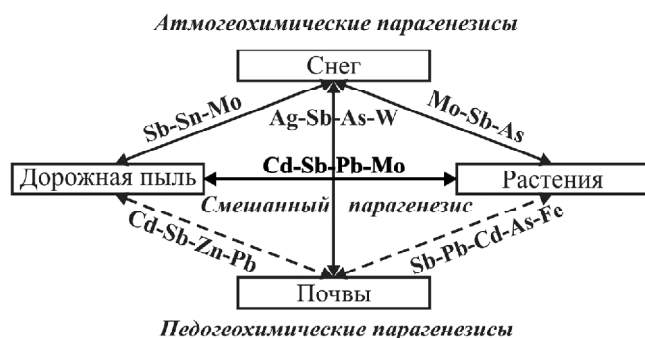


Рис. 3. Парагенезисы металлов и металлоидов в компонентах ландшафтов

Fig. 3. Parageneses of metals and metalloids in landscape components

Атмогеохимические парагенезисы преимущественно анионогенных элементов и комплексобразователей (Sb, Mo, Sn, Ag, W, As) характерны для подсистем снег–растения, снег–дорожная пыль и снег–почвы, что указывает, соответственно, на преобладание атмосферного пути поступления этих металлов и металлоидов в ландшафты. Подсистемы почвы–дорожная пыль и почвы–растения имеют **педогеохимические** парагенезисы катионогенных (Cd, Zn, Pb, Fe) и анионогенных (Sb, As) металлов и металлоидов. Это свидетельствует о преимуще-

ственно педогенно-литогенном происхождении загрязнителей в техногенных аномалиях. Промежуточное положение занимает **смешанный** парагенезис (Cd, Sb, Pb, Mo) в дорожной пыли и растениях, куда химические элементы поступают из воздуха и почв.

Геохимическая особенность ландшафтов восточной части Москвы – вхождение в состав всех парагенезисов Sb, которая, будучи индикатором воздействия автотранспорта на все компоненты, поступает в городские ландшафты с эмиссией моторного масла и в результате износа тормозных колодок, механизмов и шин [Quiroz et al., 2013]. Одна из главных причин различий парагенетических ассоциаций элементов связана с тем, что снежный покров характеризует загрязнение в зимний период, растительность и дорожная пыль – преимущественно в летний период, а почвы – многолетнее загрязнение. Парагенезисы химических элементов наряду с геохимическим портретом городского ландшафта могут служить современной методической основой для выявления и дальнейшего детального изучения техногенных аномалий загрязнителей в городских ландшафтах.

Типология геохимических аномалий. Центры геохимических аномалий в разных компонентах ландшафта обычно территориально разобщены. Комплексный анализ пространственного распределения металлов и металлоидов в отдельных компонентах городских ландшафтов позволил выявить типы аномалий загрязнителей, отражающие характер динамики загрязнения. Для этого использована система интегральных показателей – Z_d , Z_c и Z_v , которые учитывают основные техногенные процессы: выпадение загрязнителей (нагрузка), загрязнение почв и отклик живых организмов (биогеохимическая трансформация). В качестве граничных использованы следующие величины показателей: $Z_d > 250$, $Z_c > 32$, $Z_v > 25$. Выделено 8 типов техногенных геохимических аномалий металлов и металлоидов (рис. 4).

Устойчивые аномалии проявляются во всех компонентах ландшафтов, занимая участки с наиболее интенсивным техногенным воздействием с повышенным уровнем выпадения загрязнителей, сильным загрязнением почв и трансформацией химического состава растений. Они расположены на северо-западе территории рядом с промзонами Соколиная гора и Прожектор, на севере рядом с пересечением МКАД и ш. Энтузиастов, а также выделяются в виде отдельных небольших пятен в центре рядом с парком Кусково и ул. Юности и на юге рядом с мусоросжигательным заводом № 4 в промзоне Руднево. Участки устойчивых аномалий можно считать наименее благополучными с экологической точки зрения, им необходимо уделять особое внимание при эколого-геохимическом мониторинге в городах.

Регрессивные аномалии в почвах и растениях указывают на тренд к снижению загрязнения территории, когда атмосферное загрязнение и выпадение элементов уменьшаются, а уровни загрязнения почв и биогеохимической трансформации растений

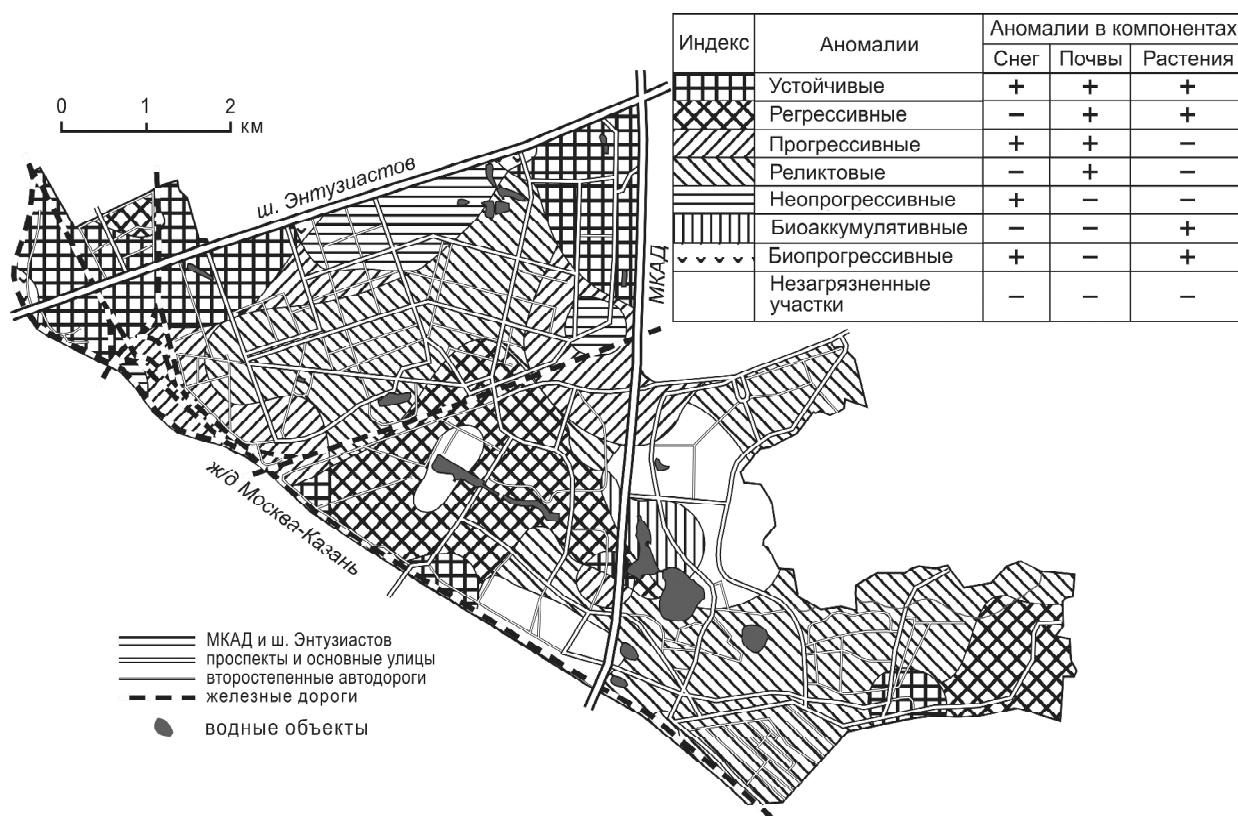


Рис. 4. Типы геохимических аномалий металлов и металлоидов в снежном покрове, почвах и растениях в восточной части Москвы

Fig. 4. Types of geochemical anomalies of metals and metalloids in snow cover, soils, and plants in the Eastern part of Moscow

остаются высокими. Такие аномалии находятся преимущественно в парке Кусково и на западе от мусоросжигательного завода в промзоне Руднево (юго-восток территории).

Реликтовые аномалии – только в почвах – характеризуют остаточное загрязнение территории, когда выпадение элементов уменьшилось, подвижные биодоступные формы поллютантов мигрировали за пределы поверхностного горизонта почв, из-за чего уменьшилась биогеохимическая трансформация растений, а уровень загрязнения почв по-прежнему высок. Такие аномалии расположены в северной части территории преимущественно в селитебной зоне, а также в юго-восточной и восточной частях в Косинском Триозерье.

Прогрессивные аномалии в снеге и почвах образуются при выпадении слабоподвижных, биологически малодоступных форм металлов и металлоидов, которые аккумулируются в почвах, но практически не поглощаются растениями, вероятно, из-за наличия так называемых физиологических барьеров поглощения [Ковалевский, 1991]. Они выявлены на северной половине территории на восток от промзон Соколиная гора, Прожектор и Перово рядом с участками реликтовых аномалий и вдоль МКАД.

Неопрогрессивные аномалии – только в снеге – указывают на современное загрязнение атмосферного воздуха, еще не проявившееся в остальных компонентах. Обширная неопрогрессивная аномалия сформировалась вдоль ш. Энтузиастов, занимая почти всю территорию Терлецкого парка и прилега-

ющие к нему с запада районы жилой застройки. Значительно меньшие по площади аномалии установлены рядом с железной дорогой Москва–Казань на западе территории, а также вдоль МКАД, что позволяет прогнозировать слияние в дальнейшем неопрогрессивных аномалий с устойчивыми и значительное увеличение площади этих сильно загрязненных районов.

Биоаккумулятивные аномалии – только в растениях – формируются, вероятно, из-за усиленного фоллиарного поглощения металлов и металлоидов растениями. Небольшая аномалия этого типа отмечена рядом с Черным озером, МКАД и ул. Большая Косинская, где в почвах велика доля подвижных форм поллютантов [Власов, 2015].

Биопрогрессивные аномалии – в снеге и растениях – занимают локальные участки рядом с неопрогрессивными аномалиями вдоль ш. Энтузиастов и рядом с железной дорогой Москва–Казань. Они сформировались, видимо, при выпадении биологически доступных форм поллютантов с техногенной пылью, которые практически не накапливаются в поверхностном горизонте почв, но активно поглощаются растениями.

Незагрязненные экологически благополучные участки находятся преимущественно в рекреационной зоне (в парке Кусково и рядом с Косинским Триозерьем), а также в жилой застройке на восток от парка Кусково. При увеличивающемся уровне техногенного воздействия велика вероятность прогрессирующего загрязнения этих территорий.

Выводы:

– для выявления контрастности аномалий металлов и металлоидов в городском ландшафте в целом и для оценки вклада его отдельных компонентов в общую аномальность создан эколого-геохимический портрет ландшафтов восточной части Москвы, показывающий приоритетные загрязнители территории – Cd, As, Pb, Mo, Sb;

– для сопряженных транзитных и депонирующих компонентов ландшафтов восточной части Москвы характерны атмогеохимический (Sb, Mo, Sn, Ag, W, As), педогеохимический (Sb, Cd, Zn, Pb, Fe, As) и смешанный (Cd, Sb, Pb, Mo) парагенезисы поллютантов;

– на основе использования системы интегральных показателей предложена типология техногенных геохимических аномалий металлов и металлоидов. На фоне небольших по площади незагрязненных участков выделены прогрессивные, неопрогрессивные, биопротрессивные, регрессивные, реликтовые, биоаккумулятивные, а также устойчивые аномалии поллютантов. Последние указывают на опасную экологическую ситуацию в северо-западной, северо-восточной, центральной и юго-восточной частях исследованной территории рядом с крупными автомобильными дорогами и промышленными зонами.

Благодарности. Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-27-00083).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Большой атлас Москвы. М.: Феория, 2012. 1000 с.
- Власов Д.В. Геохимия тяжелых металлов и металлоидов в ландшафтах Восточного округа Москвы: Автореф. канд. дисс. М., 2015.
- Власов Д.В., Касимов Н.С., Кошелева Н.Е. Геохимия дорожной пыли (Восточный округ г. Москвы) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2015. № 1. С. 23–33.
- Геохимия окружающей среды. М.: Недра, 1990. 335 с.
- Глазовский Н.Ф. Техногенные потоки вещества в биосфере // Добыча полезных ископаемых и геохимия природных экосистем. М.: Наука, 1982. С. 7–28.
- Григорьев Н.А. Распределение химических элементов в верхней части континентальной коры. Екатеринбург: УрО РАН, 2009. 382 с.
- Доклад о состоянии окружающей среды в городе Москве в 2013 году. М.: «ЛАРК ЛТД», 2014. 222 с.
- Касимов Н.С., Власов Д.В. Кларки химических элементов как эталоны сравнения в экогеохимии // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2015. № 2. С. 7–17.
- Касимов Н.С., Кошелева Н.Е., Власов Д.В., Терская Е.В. Геохимия снежного покрова в Восточном округе Москвы // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2012. № 4. С. 14–24.
- Ковалевский А.Л. Биогеохимия растений. Новосибирск: Наука, 1991. 288 с.
- Матвеев А.А., Соловов А.П. Геохимические методы поисков месторождений полезных ископаемых. М.: КДУ, 2011. 564 с.
- Методические рекомендации по оценке степени загрязнения атмосферного воздуха населенных пунктов металлами по их содержанию в снежном покрове и почве. М.: ИМГРЭ, 2006. 7 с.
- Перельман А.И., Касимов Н.С. Геохимия ландшафта. М.: Астрель-2000, 1999. 768 с.
- Регионы и города России: интегральная оценка экологического состояния / Под ред. Н.С. Касимова. М.: ИП Филимонов М.В., 2014. 560 с.
- Сорокина О.И. Тяжелые металлы в ландшафтах г. Улан-Батора: Автореф. канд. дисс. М., 2013.
- Экогеохимия городских ландшафтов / Под ред. Н.С. Касимова. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1995. 336 с.
- Hu Z., Gao S. Upper crustal abundances of trace elements: A revision and update // Chem. Geol. 2008. Vol. 253, iss. 3–4. P. 205–221.
- Quiroz W., Cortes M., Astudillo F. et al. Antimony speciation in road dust and urban particulate matter in Valparaiso, Chile: analytical and environmental considerations // Microchem. J. 2013. Vol. 110. P. 266–272.
- Rudnick R.L., Gao S. Composition of the continental crust // Treatise on geochemistry. Vol. 3. Elsevier, 2003. P. 1–64.
- Vlasov D.V., Kasimov N.S. Heavy metals in maple and dandelion leaves from different land-use areas in Moscow's Eastern District // Geography, Environment, Sustainability. 2015. Vol. 8, N 1. P. 53–70.
- Wedepohl K.H. The composition of the continental crust // Geochim. Cosmochim. Acta. 1995. Vol. 59, N 7. P. 1217–1232.

Поступила в редакцию 15.02.2016

Принята к публикации 16.03.2016

D.V. Vlasov¹, N.S. Kasimov²

**GEOCHEMICAL ANOMALIES OF METALS AND METALLOIDS
IN LANDSCAPE COMPONENTS OF THE EASTERN PART
OF MOSCOW: PARAGENESES OF CHEMICAL ELEMENTS AND TYPOLOGY**

Ecological-geochemical assessment of anomalies of different metals and metalloids in landscapes of the southern part of the Eastern District of Moscow was done through comparison of technogenic geochemical specialization of different environments (snow cover, road dust, surface horizons of urban soils, leaves of maple *Acer platanoides* and dandelion *Taraxacum officinale*). In order to estimate the contribution of landscape components to the overall geochemical anomaly of a certain area, the authors suggest producing

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Landscape Geochemistry and Soil Geography, Research Scientist, PhD in Geography; e-mail: vlasgeo@yandex.ru

² Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography Department of Landscape Geochemistry and Soil Geography, Head of the Department, Faculty President, Academician RAS, D.Sc. in Geography; e-mail: secretary@geogr.msu.ru

ecological-geochemical portraits that represent sums of enrichment factors for pollutants in different components of an urban landscape. In the eastern part of Moscow, Cd, As, Pb, Mo, and Sb are the major pollutants. Atmogegeochemical (Sb, Mo, Sn, Ag, W, As), pedogegeochemical (Sb, Cd, Zn, Pb, Fe, As) and hybrid (Cd, Sb, Pb, Mo) parageneses were revealed in transit and depositional environments. Using a system of integrated indicators, typology of technogenic geochemical anomalies was proposed. It includes progressive, neoprogressive, bioprogressive, stable, regressive, relict and bioaccumulative anomalies. Stable anomalies of pollutants with the least prosperous environmental situation are located in the northwestern, northeastern, central and southeastern parts of the area close to major roads and industrial zones.

Keywords: technogenesis, biogeochemistry, road dust, ecogeochemistry, typology of geochemical anomalies, snow cover, urban soils, urban plants.

Acknowledgements. The study was financially supported by the Russian Science Foundation (project N 14-27-00083).

REFERENCES

- Bol'shoj atlas Moskvy [The Big Atlas of Moscow], Moscow, Feorija, 2012, 1000 p. (in Russian).
- Doklad o sostojanii okruzhajushhej sredy v gorode Moskve v 2013 godu [Report on the state of environment in Moscow in 2013], Moscow, «LARK LTD», 2014, 222 p. (in Russian).
- Geohimija okruzhajushhej sredy [Environmental geochemistry], Moscow, Nedra, 1990, 335 p. (in Russian).
- Glazovskij N.F. Tehnogennye potoki veshhestva v biosfere [Technogenic flows of matter in the biosphere], *Dobycha poleznyh iskopaemyh i geohimija prirodnyh jekosistem*, Moscow, Nauka, 1982. P. 7–28 (in Russian).
- Grigoriev N.A. Raspreделение himicheskikh jelementov v verhnej chasti kontinental'noj kory [Chemical element distribution in the upper continental crust], *Ekaterinburg, UrO RAN*, 2009, 382 p. (in Russian).
- Hu Z., Gao S. Upper crustal abundances of trace elements: A revision and update // *Chem. Geol.* 2008. Vol. 253, iss. 3–4. P. 205–221.
- Jekogeohimija gorodskih landshaftov [Ecogeochemistry of urban landscapes], ed. by N.S. Kasimov, Moscow, Izdatel'stvo Moskovskogo Universiteta, 1995, 336 p. (in Russian).
- Kasimov N.S., Kosheleva N.E., Vlasov D.V., Terskaya E.V. Geohimija snezhnogo pokrova v Vostochnom okruge Moskvy [Geochemistry of snow cover within the Eastern district of Moscow], *Vestnik Moskovskogo Unversiteta, seria Geografiya*, 2012, no 4, pp. 14–24 (in Russian).
- Kasimov N.S., Vlasov D.V. Klarki himicheskikh jelementov kak jetalony sravnenija v jekogeohimii [Clarkes of chemical elements as comparison standards in ecogeochemistry], *Vestnik Moskovskogo Unversiteta, seria Geografiya*, 2015, no 2, pp. 7–17 (in Russian).
- Kovalevskij A.L. Biogeohimija rastenij [Biogeochemistry of plants], Novosibirsk, Nauka, 1991, 288 p. (in Russian).
- Matveev A.A., Solovov A.P. Geohimicheskie metody poiskov mestorozhdenij poleznyh iskopaemyh [Geochemical methods of exploration of mineral deposits], Moscow, KDU, 564 p. (in Russian).
- Metodicheskie rekomendacii po ocenke stepeni zagraznenija atmosfernogo vozduha naselennyh punktov metallami po ih sodержaniju v snezhnom pokrove i pochve [Methodical recommendations on the assessment of air pollution with metals in settlements using their content in the snow cover and soil], Moscow, IMGRJe, 2006, 7 p. (in Russian).
- Perel'man A.I., Kasimov N.S. Geohimija landshafta [Landscape geochemistry], Moscow, Astreja-2000, 1999, 768 p. (in Russian).
- Quiroz W., Cortes M., Astudillo F. et al. Antimony speciation in road dust and urban particulate matter in Valparaiso, Chile: analytical and environmental considerations // *Microchem. J.* 2013. Vol. 110. P. 266–272.
- Regiony i goroda Rossii: integral'naja ocenka jekologicheskogo sostojanija [Regions and cities of Russia: the integrated assessment of the environment], ed. by N.S. Kasimov, Moscow, publisher Filimonov M.V., 2014, 560 p. (in Russian).
- Rudnick R.L., Gao S. Composition of the continental crust // *Treatise on geochemistry*. Vol. 3. Elsevier, 2003. P. 1–64.
- Sorokina O.I. Tjzhelye metally v landshaftah g. Ulan-Batora [Heavy metals in landscapes of Ulaanbaatar city], PhD Thesis in Geography, Moscow, 2013 (in Russian).
- Vlasov D.V. Geohimija tjzhelyh metallov i metalloidov v landshaftah Vostochnogo okruga Moskvy [Geochemistry of heavy metals and metalloids in urban landscapes of Eastern District of Moscow], PhD Thesis in Geography, Moscow, 2015 (in Russian).
- Vlasov D.V., Kasimov N.S. Heavy metals in maple and dandelion leaves from different land-use areas in Moscow's Eastern District // *Geography, Environment, Sustainability*. 2015. Vol. 8, N 1. P. 53–70.
- Vlasov D.V., Kasimov N.S., Kosheleva N.E. Geohimija dorozhnoj pyli (Vostochnyj okrug g. Moskvy) [Geochemistry of the road dust in the Eastern District of Moscow], *Vestnik Moskovskogo Unversiteta, seria Geografiya*, 2015, no 1, pp. 23–33 (in Russian).
- Wedepohl K.H. The composition of the continental crust // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1995. Vol. 59, N 7. P. 1217–1232.

Received 15.02.2016

Accepted 16.03.2016

УДК 911.2.:550.4

И.А. Авессаломова¹**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 Са и Р, характерные для агроценозов. 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.

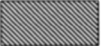
Материалы и методы исследований. Объект исследований – агроландшафты, возникшие на ме-

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. Заячь (междуречье Кокшеньги и Устья, 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-

Элементарные ландшафты	Естественные		Сельскохозяйственные		
	лесные	луговые	пашни	залежи	сенокосы
Автономные, Н-, Н-Са-класс, моренные равнины		—			—
Трансэлювиальные, Н-класс, склоны моренных равнин	—	—			—
Трансэлювиальные, Н-Са-, Са-класс, склоны структурного плато					—
Трансаккумулятивные, II-Са-класс, делювиальные шлейфы	—	—			—
Автономные, II-класс, речные террасы		—			—
Элювиально-аккумулятивные Н-, Н-Са-класс, днища логов					—
Супераквальные, Н-Fe-, Н-Са-Fe-класс, днища логов и конуса			—	—	—
Супераквальные, Н-Fe-, Н-Са-Fe-класс, поймы			—		

 1  2

Рис. 1. Элементарные ландшафты гетеролитных катен в среднем и нижнем течении р. Заячь. 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 50x50 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 сенокосения

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 $A_{\text{пах}}$ 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 соответственно), 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, филогенетической 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 вариативности 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 ($KK=10n$) относятся В, Мо, среднего накопления ($KK=n$) – Ag, Cu, Zn, слабого накопления и среднего захвата ($KK=0,n$) – Ba, Sr, Mn (табл. 1). Активное поглощение аниогенных и пониженное катиогенных 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 катиогенных и увеличением доступности аниогенных 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 KK катиогенных 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, В, Мо 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-

Т а б л и ц а 1

Ряды биологического поглощения микроэлементов в агроландшафтах и таежных лесах

Названия растений и их систематических групп	Кларки концентрации микроэлементов в золе растений		
	10n	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

П р и м е ч а н и я: 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 вариативность 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 вариативность прослеживается у разных фракций травяного покрова, но наиболее четко для разнотравья. Основной тренд отражает изменение зольности в зависимости от положения в катене и связи 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

Т а б л и ц а 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	

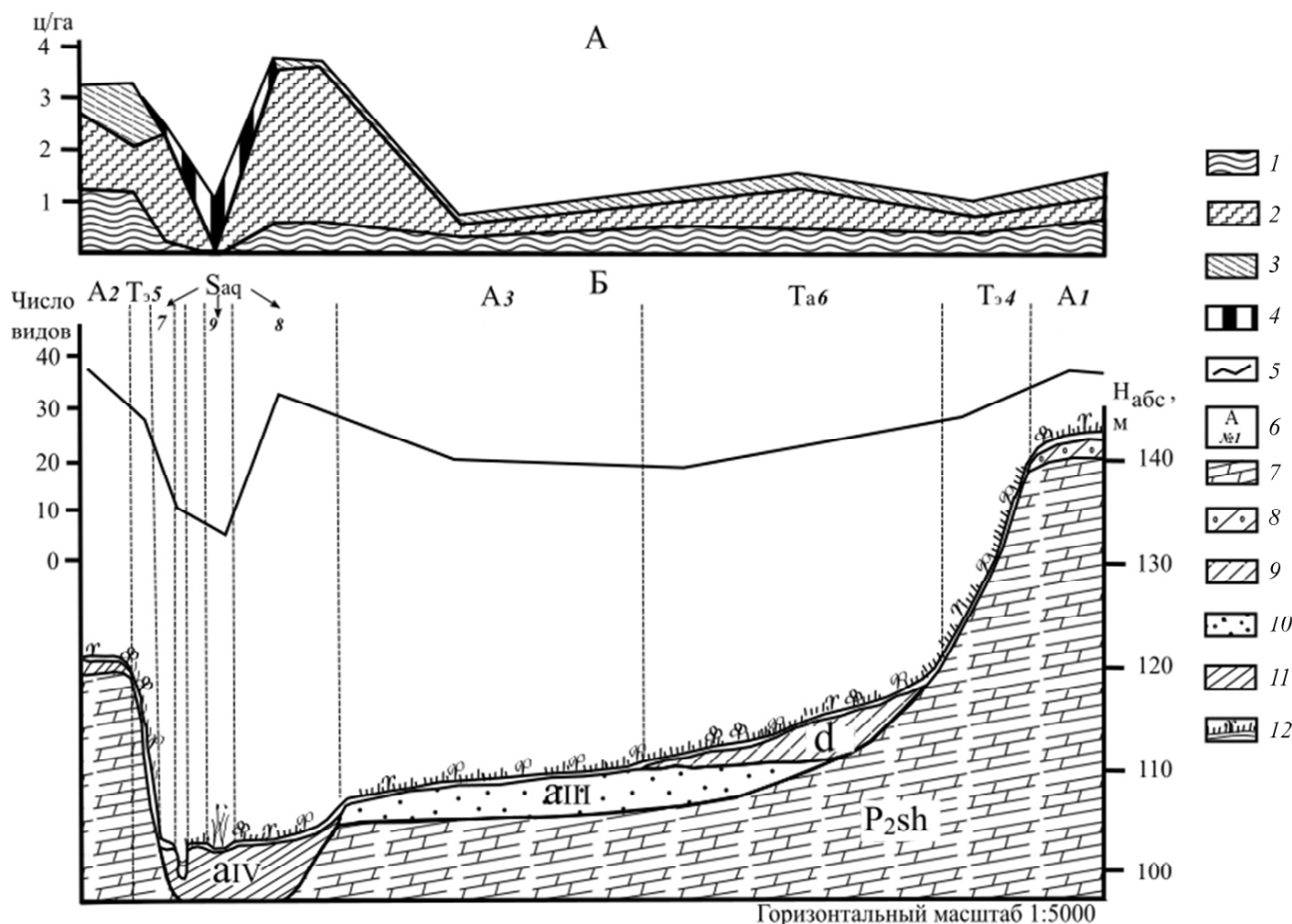


Рис. 2. Биогеохимические параметры залежных лугов в гетеролитной постагрогенной катене (1997 г.)

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: А1 – структурное плато, сложенное мергелями, перекрытыми маломощной мореной, с клеверово-разнотравно-злаковыми залежными лугами на выщелоченных дерново-карбонатных почвах, Н-Са-класс; А2 – высокая цокольная терраса с бобово-злаково-разнотравными лугами на маломощных выщелоченных дерново-карбонатных почвах, Н-Са-класс; А3 – низкая цокольно-аккумулятивная терраса с разнотравно-полевицевыми залежными лугами на иллювиально-железистых подзолах, Н-класс; трансэлювиальные: Т4 – коренные склоны, сложенные мергелями, с бобово-разнотравно-злаковыми залежными лугами на смытых дерново-карбонатных почвах, Са-класс; Т5 – склоны цокольных террас с разнотравно-злаково-бобовыми лугами на дерново-карбонатных почвах, Са-класс; трансаккумулятивные: Та6 – шлейф, наложенный на цокольно-аккумулятивную террасу, с злаково-бобово-разнотравными залежными лугами на выщелоченных дерново-карбонатных почвах, Н-Са-класс; супераккумулятивные: Са7 – пролювиальный конус, наложенный на пойму, с разнотравно-таволговыми лугами на перегнойно-глеевых почвах, Н-Са-Fe-класс; Са8 – пойма с бобово-богаторазнотравно-злаковыми лугами на пойменных аллювиальных дерновых слоистых почвах, Н-класс; Са9 – 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 postagrogenic catena (1997):

А – 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: А1 – 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; А2 – high erosional terrace, with legume-grass-motley grass meadows on thin leached sod-carbonate soils, H-Ca-class; А3 – low erosional-accumulative terrace, with motley grass-bent grass fallow meadows on illuvial-ferruginous podzolic soils, H-class; transeluvial: Т4 – bedrock slopes composed by marls, with legume-motley grass-grass fallow meadows on removed sod-carbonate soils, Ca-class; Т5 – slopes of erosional terraces, with motley grass-grass-legume meadows on sod-carbonate soils, Ca-class; transaccumulative: Та6 – fan overlying the erosional-accumulative terrace, with grass-legume-motley grass fallow meadows on leached sod-carbonate soils, H-Ca-class; superaquatic: Са7 – proluvial fan over the flood-plain, with motley grass-spirea meadows on humus-gley soils, H-Ca-Fe-class; Са8 – flood-plain with legume-rich motley grass-grass meadows on flood-plain alluvial turfey laminated soils, H-class; Са9 – 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 В и Мо бобовыми и разнотравьем, снижение поглощения В у злаков и др.). Различия заключаются в переходе Мп 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 Мо и В, увеличении КК Аг и Мп 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-полевичевых 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 В и Мо при увеличении роли бобовых и разнотравья, активное поглощение Мп при доминировании осок в супераквальных ландшафтах Н-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 лугово-лесными 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 сенокосения 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 эрозийное расчленение агроландшафтов и появление неполных сопряжений с конечным звеном на днищах логов с высокой и средней степенью обеспеченности Р и К органогенных горизонтов почв [Авессаломова, 2014]. На распаханых южных склонах днища логов заняты сухими разнотравно-овсяницево-тимфеевковыми 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 В. 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-

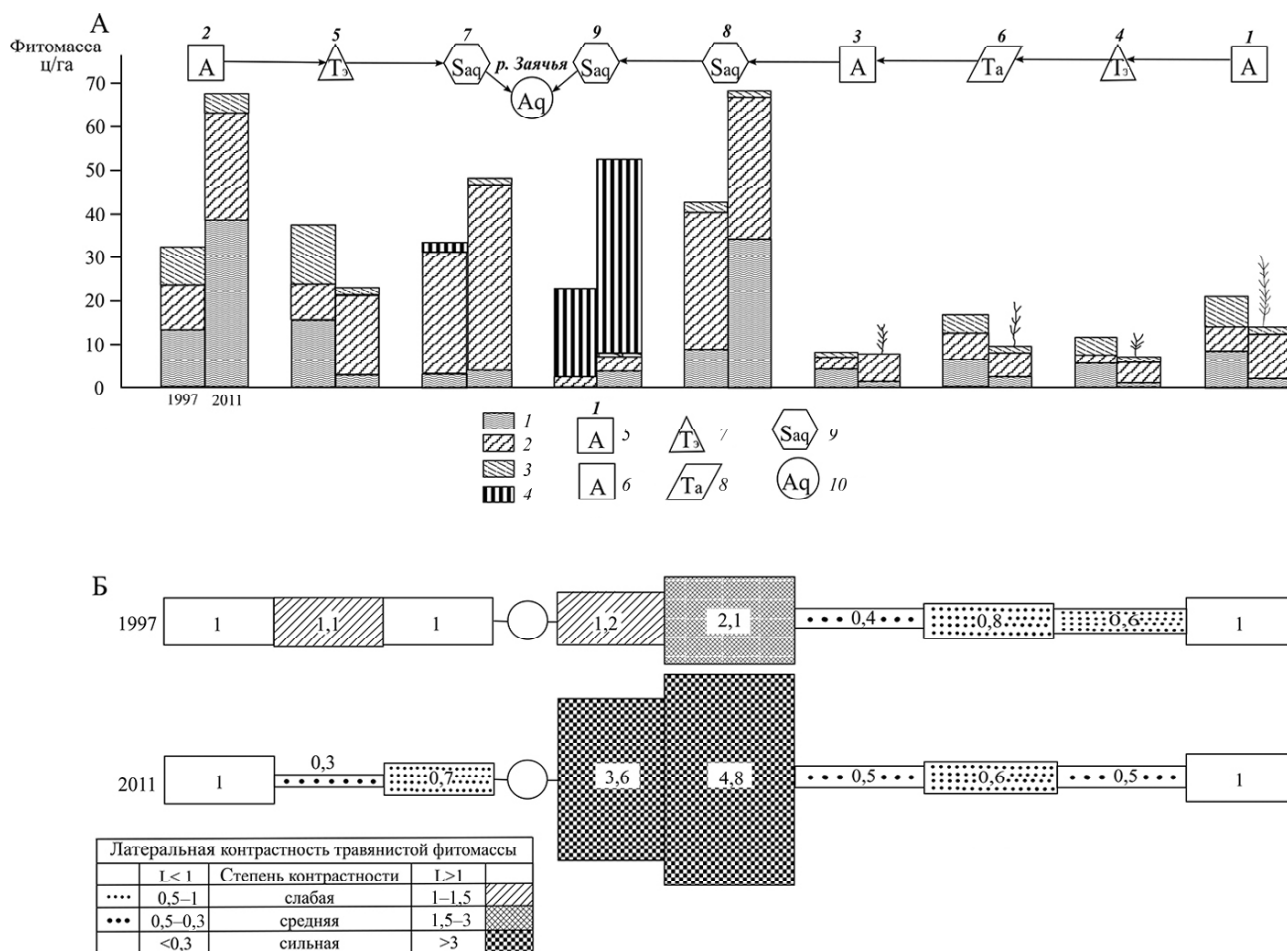


Рис. 3. Изменение фитомассы залежных лугов в гетеролитной постагрогенной катене за 15 лет.

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 (А1,2,3), 7 – транселювиальные (Тэ4,5), 8 – трансаккумулятивные (Та6), 9 – супераккумулятивные (Саg7,8,9), 10 – аквальные (Аq, р. Заячьа);

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.

А – Correlation of the fraction structure of the meadow grass phytomass 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 (A1,2,3), 7 – transeluvial (Te4,5), 8 – transaccumulative (Ta6), 9 – superaquatic (Saq7,8,9), 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 Мо, 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 аниогенных (Р, Мо, В) и катиогенных (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 пара-

метрам автотрофного биогенеза, но и сохраняют филогенетическую специализацию гумидокатных видов. Например, в хвое елей и сосен поглощения Mn (КК до 10) выше, чем Мо, 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 catenaх 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 catena и усилении положительных обратных связей, способствующих перестройке бывших угодий при сукцессионных 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 catena 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.: Астрель-2000, 1999. 768 с.

Kabata-Pendias A., Pendias H. Biogeochemistry of plant and soil. Warszawa: PWN, 1999. 398 s.

Поступила в редакцию 26.01.2016

Принята к публикации 18.03.2016

I.A. Avessalomova¹

BIOGEOCHEMICAL 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 geografiiya pochv.* Moscow, APR, 2012, pp. 97–117 (in Russian).
- Avessalomova I.A.* Landshaftnoe sosiedstvo 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 life 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 organizovannost' 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, Geograficheskii 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 geokhimiya... (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], Moscow, Astreya-2000, 1999, 768 p. (in Russian).

Received 26.01.2016

Accepted 18.03.2016

УДК 504.064.2; 504.453; 504.454; 504.4.054

Н.С. Касимов¹, М.Ю. Лычагин², С.Р. Чалов³, Г.Л. Шинкарева⁴, М.П. Пашкина⁵,
А.О. Романченко⁶, Е.В. Промахова⁷

БАССЕЙНОВЫЙ АНАЛИЗ ПОТОКОВ ВЕЩЕСТВ В СИСТЕМЕ СЕЛЕНГА–БАЙКАЛ

Выполнен региональный бассейновый анализ формирования стока воды, взвешенных наносов и содержащихся в них тяжелых металлов и металлоидов (ТММ) в системе р. Селенга – оз. Байкал, основанный на результатах комплексных гидролого-геохимических исследований авторов, выполненных в 2011–2013 гг. по единой методике в основные фазы водного режима более чем на 100 створах в пределах России и Монголии. Показано, что количественные параметры транспортировки взвешенных наносов во многом определяются фазой водного режима. Вклад половодья и паводков в их перенос составляет от 52% годового стока на крупных реках до 99% на малых.

Результаты химического анализа методом ICP-MS/ICP-AES более 400 проб воды и взвешенных наносов показали, что реки бассейна Селенги обогащены относительно среднего содержания в реках мира растворенными Sr, Li, U, Br, B, Mo, As, для которых преобладающей формой миграции является ионная, а также Fe, Al, Zn и Pb, мигрирующими в форме комплексных соединений с органическим веществом. Во взвешенных наносах Селенги и ее притоков повышено содержание As, Cd, Mo, Pb, Zn, Mn, Co, что обусловлено как геохимической специализацией региона (As), так и техногенным воздействием (Cd, Mo, Pb).

Анализ соотношения форм миграции химических элементов в речных водах показал, что для большинства ТММ преобладают взвешенные формы в верхней части бассейна и растворенные в средней и нижней. Доля взвешенных форм миграции резко возрастает при прохождении паводков, особенно в верховьях рек; в нижней части бассейна влияние паводков на соотношение форм уменьшается, что особенно заметно в дельте Селенги.

Геохимические потоки растворенных форм ТММ в паводок увеличивались по направлению к дельте Селенги по мере возрастания водности реки. В верхней части бассейна отмечены экстремально высокие потоки взвешенных форм, что обусловлено выпадением ливневых осадков, потоки быстро уменьшаются вниз по течению благодаря осаждению наносов. В нижней части бассейна потоки снова возрастают в связи с впадением крупных притоков. Наибольшие техногенные изменения потоков характерны для малых рек (Модонкуль, Хангалынгол, Туул, Уда и др.), испытывающих воздействие городов и объектов горнодобывающей промышленности. Выявлено экстремально высокое загрязнение р. Модонкуль Cd и другими металлами, которое существенно влияет на геохимические потоки ТММ в р. Джиде вплоть до ее впадения в Селенгу.

Ключевые слова: бассейновый анализ, р. Селенга, оз. Байкал, геохимические потоки, формы миграции, вода, взвешенные наносы, тяжелые металлы, металлоиды.

Введение. В соответствии с принципами организации ландшафтно-геохимических систем, разработанными А.И. Перельманом [1975] и М.А. Глазовской [1988], бассейны рек – каскадные ландшафтно-геохимические системы (КЛГС), в пределах которых протекают процессы миграции, трансформации и аккумуляции различных веществ природного и антропогенного происхождения. Речные бассейны в целом представляют собой системы концентрации стока и преобладающего транзита

химических элементов, а их нижние звенья и дельты рек – каскадные системы рассеяния стока и аккумуляции веществ, в первую очередь твердых речных наносов.

Бассейновый подход к анализу потоков веществ позволяет выявить природную геохимическую специализацию водосборов, определить роль притоков разного порядка в формировании жидкого и твердого стока, оценить влияние источников загрязнения, а также провести количественную параметризацию

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, заведующий кафедрой геохимии ландшафтов и географии почв, профессор, академик РАН; *e-mail*: secretary@geogr.msu.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра геохимии ландшафтов и географии почв, доцент, канд. геогр. н.; *e-mail*: lychagin@geogr.msu.ru

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра гидрологии суши, ст. науч. с., канд. геогр. н.; *e-mail*: srchalov@rambler.ru

⁴ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра геохимии ландшафтов и географии почв, мл. науч. с.; *e-mail*: galina.shinkareva@gmail.com

⁵ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра гидрологии суши, студент; *e-mail*: m.pashkina.msu@gmail.com

⁶ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра гидрологии суши, аспирант; *e-mail*: a.o.romanchenko@gmail.com

⁷ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, лаборатория эрозии почв и русловых процессов имени Н.И. Маккавеева, мл. науч. с.; *e-mail*: promakhova@gmail.com

осаждения химических элементов и соединений в устьевых областях рек и их выноса в приемные водоемы. Он предполагает выявление качественных или количественных связей между природно-антропогенными характеристиками водосборов и балансом загрязняющих веществ [Корытный, 2001]. Региональные исследования вещественных потоков проводятся в основном для бассейнов малых рек [Garcia-Ruiz et al., 2008; Olefeldt et al., 2013], для рек большего размера они базируются либо на ограниченном числе исследуемых элементов [Audry et al., 2004], либо выполнены для замыкающих створов [Horowitz, Stephens, 2008; Ollivier et al., 2011].

Особое значение бассейновый анализ территорий имеет для крупных трансграничных рек, использование ресурсов которых может вызвать международные конфликты, связанные с регулированием речного стока и гидротехническим строительством, загрязнением воды и др. К числу таких рек относится Селенга, водосбор которой находится на территории двух стран – России и Монголии. Селенга – главный приток оз. Байкал – объекта Всемирного природного наследия. В последнее десятилетие ее бассейн испытывает значительное усиление техногенной нагрузки, в первую очередь в монгольской части, что обусловлено бурным развитием урбанизации, добычи золота и других полезных ископаемых, пастбищного животноводства и т.д. Проблема экологического состояния водных объектов бас-

сейна Селенги, трансграничного переноса загрязняющих веществ, их аккумуляции в дельте Селенги и выноса в оз. Байкал привлекает внимание исследователей многих стран [Алексеевский и др., 2013; Chalov et al., 2013; Karthe et al., 2014; Thorslund et al., 2012; Inam et al., 2011].

В настоящее время достаточно хорошо изучен химический состав речных вод главным образом российской части бассейна, проводится мониторинг содержания растворенных загрязняющих веществ в Селенге и ее основных притоках. Намного слабее исследован перенос поллютантов со взвешенными наносами. Средняя плотность гидрометрических постов в бассейне невысокая: на российской территории – 1 пост на 3750 км², на монгольской – почти в 4 раза меньше (1 пост на 16 500 км²). Систематические наблюдения за характеристиками качества воды осуществляются на еще более редкой сети гидрологических постов. Например, в пределах российской части бассейна мутность воды систематически определяется всего на 12 постах для 4 рек. Ограниченность информации обусловила необходимость проведения комплексных гидролого-геохимических исследований по единой методике в основные фазы водного режима одновременно в российской и монгольской частях бассейна.

Бассейн Селенги площадью 447 000 км² расположен на территории Монголии (67%) и Российской Федерации (33% площади) (рис. 1). Селенга начи-

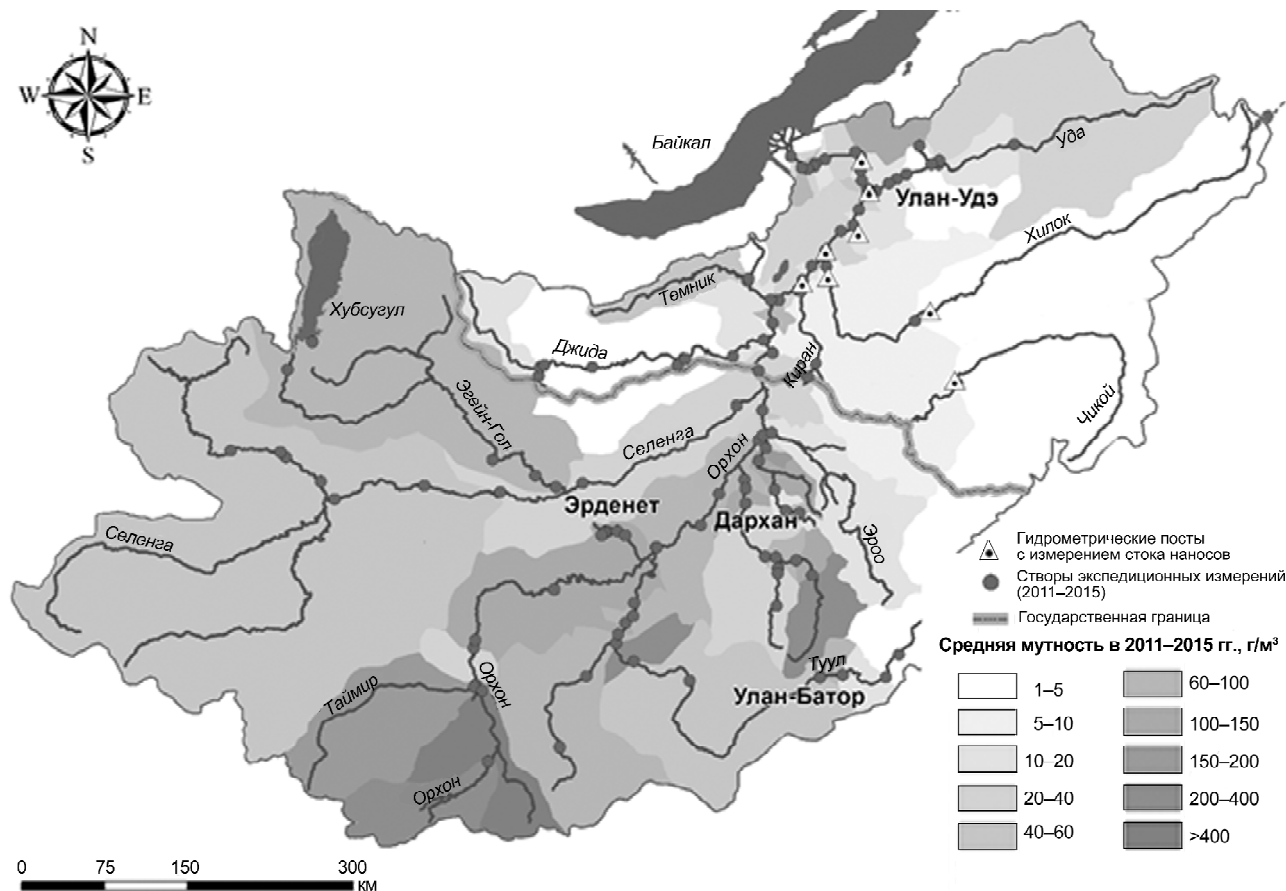


Рис. 1. Район бассейна р. Селенга

Fig. 1. The Selenge River catchment area

нается от слияния рек Идэр и Дэлгэр-Мурэн и через 1024 км впадает в оз. Байкал. Она, как крупнейший приток озера, ежегодно поставляет в Байкал около 30 км³/год воды, т.е. около 60% общей приходной части его водного баланса.

В целом территория бассейна Селенги отличается контрастностью и сложностью природных условий, влияющих на ландшафтно-геохимические процессы, формирование и преобразование геохимических потоков веществ [Герасимова и др., 2014]. Территория характеризуется средними и низкими горными хребтами ($H_{абс} = 800\div 2000$ м) в сочетании с широкими котловинами и речными долинами; сложным литогеохимическим фоном, обусловленным разнообразными массивными кристаллическими породами кислого и основного состава, чередующимися с вулканогенными и терригенными; резко континентальным климатом с большой амплитудой колебания температуры воздуха и малым количеством осадков; замедленностью миграционных процессов и заторможенностью биологического круговорота; контрастами вертикальной зональности и экспозиционных эффектов (от нивальных до степных ландшафтов) и, как следствие, резкой дифференциацией биогенной миграции веществ.

Природные потоки веществ трансформируются под влиянием многочисленных источников загрязнения, среди которых в монгольской части бассейна выделяются г. Улан-Батор, где в настоящее время проживает более 1,3 млн человек, т.е. около половины населения Монголии; Эрдэнетский горно-обогатительный комбинат (ГОК) – одно из крупнейших в Азии предприятий по добыче и обогащению меди и молибдена; золотые прииски на р. Туул (Заамар) и р. Хараа; в российской части – г. Улан-Удэ с развитой промышленностью и населением около 400 тыс. человек, а также г. Закаменск, где особую экологическую опасность представляют хвостохранилища бывшего Джидинского вольфрамо-молибденового комбината. Необходимо отметить и быстрое развитие сельского хозяйства в монгольской части бассейна, сопровождающееся загрязнением водных объектов и деградацией пастбищных земель [Огуреева и др., 2012].

Материалы и методы исследований. Рассмотрены результаты комплексных гидролого-геохимических исследований авторов, выполненных в 2011–2013 гг. более чем на 100 створах в пределах Монголии – на реках Селенга, Орхон, Хангол, Тула, Хара, Эроо, Эг, а в России – на реках Селенга, Уда, Джида, Темник, Чикой, Хилок, Оронгой, Итанца, Киран, Кидара, Желтура, Удунга, Сухара, Тугнуй, Менза, Буй, Брянка, Илка, Челутай Курба, Кодун, Кижинга, Она. Используются также многолетние данные о характеристиках стока воды и взвешенных наносов с постов Гидрометслужб РФ и Монголии, расположенных в бассейне Селенги (рис. 1). Среднюю измеренную мутность для разных створов многолетних наблюдений вычисляли по формуле $S_{cp} = \sum S_i / n$, где n – число лет, в которые проводились измерения.

В ходе полевых работ измеряли расходы воды, величину pH, ORP, TDS, отбирали пробы воды (более 400), взвешенных наносов (более 400), донных отложений и почв (более 500). Из-за относительно слабой изученности особое внимание уделяли взвешенным наносам. Для определения мутности на стержне потока пробы воды отбирали батометром-бутылкой. Осаждали взвешенные частицы с помощью фильтровальной системы «Millipore» через мембранные фильтры (диаметр фильтра 4,7 см, размер пор 0,45 мкм). На контрольных створах наряду с прямым (весовым) методом определения содержания взвешенных частиц в воде использовали оптический способ оценки мутности фотомутномером «НАСН» 2100Р.

Гранулометрический состав взвешенных наносов анализировали на лазерном гранулометре «Fritsch Analysette 22». Содержание органического вещества во взвеси определялось либо на CHNS-анализаторе, либо по потере при прокаливании в муфельной печи при 400 °С с предварительной обработкой концентрированной HCl для удаления карбонатов. Количество растворенного органического вещества определяли на анализаторе «Shimadzu TOC-L CPH» на основе определения неочищенного органического углерода (NPOC) в пробах воды, профильтрованных через мембранные фильтры с размером пор 0,22 мкм. Анализ гранулометрического состава и содержания органического вещества выполнен в лабораториях географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

Содержание широкого круга химических элементов (Li, Be, B, Na, Mg, Al, Si, P, S, K, Ca, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Ge, As, Se, Br, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Ru, Rh, Pd, Ag, Cd и др.) в растворенной форме ($C_{раств}$, мкг/л), в твердофазном состоянии в составе влекомых ($C_{вл}$, мкг/г) и взвешенных ($C_{взв}$, мкг/г) наносов определяли масс-спектральным методом с индуктивно-связанной плазмой и атомно-эмиссионным методом с индуктивно-связанной плазмой на приборах «Elan-6100» и «Optima-4300 DV» («Perkin-Elmer», США) во Всероссийском институте минерального сырья имени Н.М. Федоровского (ВИМС).

Содержание химических элементов в воде сравнивали с российскими санитарно-гигиеническими нормативами для водоемов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования (ПДК_в), а также водоемов рыбохозяйственного значения (ПДК_{вр}). Для характеристики загрязнения взвешенных наносов рассчитывали значения коэффициента концентрации (K_c) и суммарный показатель Z_c .

Вещественные потоки изучали с использованием детерминированной модели формирования стока с полураспределенными параметрами Ecomag, модели эрозионного потенциала RUSLE и региональной мезоклиматической модели COSMO-CLM. Анализ процессов переноса и аккумуляции вещества осуществлялся на основе обобщения сетевых и экспедиционных данных, интегрированных с выходными данными моделей формирования вещественных

потоков в моделях регионального (модель смыва и баланса наносов SedNET), руслового (одномерная гидродинамическая модель 250-километрового участка р. Туул-Орхон, HEC-RAS) и локального масштаба (эрозионная модель доставки наносов с участка разработки россыпного золота в долине р. Туул, WATEM/SEDEM).

Результаты исследований и их обсуждение.

Водность рек. Среднемноголетний годовой объем стока р. Селенга равен $28,7 \text{ км}^3$, наибольший объем стока составляет $46,4 \text{ км}^3$, наименьший – $16,3 \text{ км}^3$. Для рек в бассейне Селенги характерно крайне неравномерное распределение стока внутри года: 80–90% объема годового стока приходится на теплую часть года, зимой он незначителен или отсутствует вследствие промерзания водотоков. Практически ежегодно в течение 1–4 месяцев прекращается сток на реках с площадью водосборов до $40\,000 \text{ км}^2$, при этом в последние десятилетия сток р. Туул (площадь водосбора около $50\,000 \text{ км}^2$) ниже г. Улан-Батор формируется исключительно сточными водами и прекращается на расстоянии $\sim 100 \text{ км}$ ниже столицы Монголии.

С 1995 г. наблюдается период маловодья, характеризующийся снижением расходов воды в 2–3 раза на реках бассейна Селенги в пределах Монголии и в 1,5–2 раза в пределах Российской Федерации по сравнению с периодом 1983–1995 гг. В качестве непосредственных причин маловодья указаны общее ослабление циркуляции в области конвергенции воздушных масс умеренных широт и восточноазиатского муссона, а также глобальные климатические изменения [Бережных и др., 2012]. Темп потепления в районе Байкала ($1,2^\circ\text{C}$) за последнее столетие в 2 раза превышал рост глобальной температуры, но был существенно ниже, чем над окружающей сушей (2°C для Иркутска), что может быть следствием инерции водных масс Байкала [Шимараев и др., 2010].

Транспортировка наносов. Значительная часть загрязняющих веществ, мигрирующих с речным стоком, связана с твердой фазой, представленной взвешенными и влекомыми наносами. Селенга ежегодно выносит к вершине дельты $1,73 \text{ млн т}$ взвешенных наносов, что соответствует среднегодовому расходу (R), равному 55 кг/с (1941–2013 гг., разъезд Мостовой). В нижнем течении р. Селенга измеренный темп смещения крупных гряд составляет 1390 м/год , т.е. сток влекомых наносов оценивается величиной $0,77 \text{ млн т/год}$ или $\sim 45\%$ суммарного стока наносов. Таким образом, суммарный сток взвешенных и влекомых наносов к дельте составляет $2,51 \text{ млн т/год}$, что по крайней мере в 2 раза меньше, чем сток наносов в предшествующий период водности [Потемкина, 2011] и соответствует уменьшению среднегодовых значений мутности воды от 3 мг/л (р. Дэлгэр-Мурэн, верхнее течение Селенги) до 70 мг/л (в нижнем течении Селенги) за маловодный период 1996–2015 гг. по сравнению с многоводным периодом 1983–1995 гг. [Chalov et al., 2015]. Указанные тенденции объясняются гидроклиматическими факторами – снижением водности, а

также уменьшением сельскохозяйственного освоения земель в Бурятии в конце XX–начале XXI в.

В верхней части бассейна Селенги значительные территории заняты горностепными ландшафтами, поставляющими в реки большой объем твердых частиц при выпадении ливневых осадков. На отдельных участках рек в периоды повышенного стока наблюдается сильное увеличение мутности воды с ее последующим продольным снижением. В период межени реки в целом характеризуются продольным увеличением расходов взвешенных наносов, в первую очередь за счет привноса материала от боковых притоков, максимальные расходы отмечены в створе выше дельты Селенги.

На мутность малых рек в бассейне Селенги сильно воздействуют урбанизация и горные работы. В пределах г. Улан-Батор в разные фазы водного режима мутность воды р. Туул, правого притока р. Орхон, может увеличиваться более чем в 5 раз по сравнению с ее верхним течением. В период зимней межени в условиях природного перемерзания сток р. Туул формируется за счет сброса сточных вод со средним расходом около $5 \text{ м}^3/\text{с}$ и исключительно высокими значениями мутности воды ($>300 \text{ г/м}^3$), что приводит к формированию протяженного ($>400 \text{ км}$) шлейфа загрязненных вод вплоть до устья реки. В р. Хангалынгол, небольшом притоке Орхона, в долине которой разрабатывается медно-молибденовое месторождение и находится г. Эрдэнэт, сброс производственных и других сточных вод приводит к увеличению содержания взвешенных веществ в воде в десятки раз. В отдельные сезоны увеличивается мутность рек Эроо, Джиды и др.

Природные различия условий формирования стока наносов определяют неоднородность их гранулометрического состава. Частицы размером $\leq 0,05 \text{ мм}$ имеют, как правило, бассейновое происхождение, а более крупные фракции – русловой генезис [Алексеевский, 1998]. В реках бассейна Селенги в составе взвеси преобладают частицы бассейнового генезиса, их содержание достоверно связано ($r = 0,79$) с мутностью воды. В среднем $\geq 50\%$ стока взвешенных наносов составляют частицы диаметром $0,01\text{--}0,05 \text{ мм}$, с многократным изменением их крупности в отдельные сезоны года (табл. 1). Средний медианный диаметр взвешенных наносов d_{50} в 2011–2013 гг. составил $0,066 \text{ мм}$. Минимальные значения d_{50} ($0,014\text{--}0,025 \text{ мм}$) отмечены в среднем и нижнем течении рек Орхон, Бороо и Туул, максимальные ($0,485\text{--}0,825 \text{ мм}$) – в верховьях рек Туул, Хаара, Уда.

В периоды паводков в составе взвешенных наносов возрастает доля тонкодисперсных фракций, поступление которых в реки связано с поверхностным природным и техногенным смывом, эрозией почв и отвалов пород горнодобывающих предприятий, стоком с селитебных территорий, сточными водами и др. Мелкие частицы бассейнового генезиса обладают высокой сорбционной способностью и играют значительную роль в переносе загрязняющих веществ.

Таблица 1

Расход воды (Q), ее мутность (S) и содержание $C_{\text{орг}}$ во взвешенных наносах

Период измерения		Сезон	М/Р*	Q, м ³ /с		S, мг/л			C _{орг} , %		
год	дата			max	min	max	min	среднее	max	min	среднее
2011	15.07.–25.08.	Летние паводки	М	465	0,10	2850	6,4	229	16,3	0,92	6,75
			Р	902	–	47	1,4	18	–	–	–
2012	08.06.–15.07.	Межень и начало паводков	М	107	0,07	1249	1,7	82	12,8	2,25	5,62
			Р	1439	–	150	1,7	50	13,3	2,75	6,09
2013	05.09.–30.09.	Спад паводков	М	105	0,3	225	6,7	73	12,6	0,42	3,75
			Р	–	–	43	2,0	25	23,6	6,21	2,26
2014	06.08.–25.08.	Летние паводки	М	–	–	147	0,51	43	–	–	–
			Р	–	–	31	2,93	15,3	–	–	–
2015	03.03.–25.03.	Зимняя межень	М	64,8	0	312	0,68	18 (5)**	3,99	0,23	0,71
			Р	–	–	9,12	0,91	2,2	–	–	–

Примечания. Прочерк – показатель не определялся. * М – монгольская, Р – российская часть бассейна; ** в скобках – без учета р. Туул ниже Улан-Батора.

Содержание органического вещества в составе взвеси варьирует от 23,6% в паводки до почти полного исчезновения в зимнюю межень (табл. 1). Среднее содержание $C_{\text{орг}}$ в периоды экспедиционных исследований составляло от 4 до 6%. Минимальные значения (<2%) отмечены на участках рек, испытывающих сильное техногенное воздействие (добыча золота, крупные города), максимальные – на участках с низкой антропогенной нагрузкой. В верхнем течении рек Орхон, Туул, Хаара содержание органического вещества во взвеси составило 6–11%, на российских притоках Селенги оно еще выше: в р. Желтура – 10,4%, в р. Джиды – 13,3%, в р. Темник – 23,6%. Содержание $C_{\text{орг}}$ во взвеси подвержено сезонным изменениям – летом оно повышено, а осенью и зимой понижено.

Таким образом, при переходе от верхних звеньев бассейна Селенги к нижним в составе взвешенных наносов увеличивается содержание тонкодисперсных частиц. В нижней части бассейна Селенги преобладают процессы аккумуляции наносов в паводочный период и размыв русловых отложений в межень [Алексеевский и др., 2013]. На изученных постах общий вклад половодья и паводков в транспорт наносов взвешенных наносов составляет от 52 до 99% их годового стока. Самая высокая доля стока наносов формируется в многоводные годы, наименьшая – в маловодные. Для наиболее крупных рек доля стока наносов в год со средней водностью соответствует средней многолетней доле стока воды за теплый период. На малых реках роль периода повышенной водности в годовом стоке взвешенных наносов максимальна. Полученные характеристики транспортировки наносов позволили количественно оценить геохимические потоки веществ в исследуемом речном бассейне.

Растворенные формы тяжелых металлов и металлоидов в речных водах. Реки бассейна Селенги в целом имеют низкую минерализацию – 50–150 мг/л в периоды половодий и паводков, 100–

200 мг/л в межень. Минерализация рек в монгольской части бассейна относительно повышена из-за меньшего количества осадков и большей засушливости климата. Минерализация воды в Селенге составляет 150–250 мг/л у границы России и Монголии (пос. Наушки) и уменьшается до 100–150 мг/л вниз по течению по мере разбавления водами притоков (реки Джиды, Темник, Чикой, Хилок, Уда и др.). Более высокая минерализация воды (>300 мг/л) характерна для малых рек, дренирующих засоленные породы (р. Киран, приток р. Чикой) либо подверженных техногенному воздействию (реки Модонкуль, Хангалынгол). Речные воды имеют гидрокарбонатно-кальциевый состав, нейтральную и слабощелочную реакцию среды (pH 7,0–8,0), на отдельных участках – щелочную (pH 8,0–9,0). Содержание растворенных органических веществ в межень варьирует в пределах 2–5 мг/л, возрастая в половодье до 10–15 мг/л. Повышенное содержание $C_{\text{орг}}$ нередко отмечается в Селенге у пос. Наушки, вниз по течению оно снижается, что обусловлено природными факторами. Ниже г. Улан-Удэ из-за сброса городских сточных вод содержание органических веществ, особенно легкогидролизуемых, в Селенге снова возрастает [Башенхаева и др., 2006].

Разнообразие природных условий водосборного бассейна в сочетании с техногенным воздействием определяет уровень содержания и пространственные различия в распределении растворенных форм химических элементов в речных водах. Реки бассейна Селенги относительно среднего содержания в реках мира [Gaillardet et al., 2004; Гордеев, 2012] в наибольшей мере обогащены растворенными формами Fe, Al, Zn и Pb, среднее содержание которых как в паводок 2011 г., так и в межень 2012 г. на порядок превысило среднемировое (табл. 2).

Эти металлы образуют *первую ассоциацию*, они слабо подвижны в нейтральной и щелочной среде, но могут образовывать растворимые комплексные соединения с органическим веществом [Край-

Таблица 2

Среднее содержание растворенных форм химических элементов в речных водах бассейна Селенги

ТММ	Паводок, 2011 (74) ¹		Межень, 2012 (98) ¹		Спад паводка, 2013 (92) ¹		Реки мира ²
	мкг/л	К _с ³	мкг/л	К _с	мкг/л	К _с	
Fe	422	6,4	725	11,0	26	0,4	66
Al	439	13,7	433	13,5	28	0,9	32
Zn	31	51,7	8,9	14,8	7,0	11,7	0,6
Pb	1,1	11,0	1,4	14,0	0,1	1,0	0,1
Cu	2,1	1,4	2,7	1,8	1,5	1,0	1,5
Ni	1,4	1,8	1,6	2,0	0,6	0,8	0,8
Co	0,3	1,5	0,4	2,0	0,1	0,5	0,2
Br	92	4,6	24	1,2	16	0,8	20
B	18	1,8	11	1,1	11	1,1	10
Mo	2,1	5,3	1,6	4,0	1,2	3,0	0,4
As	2,4	4,0	1,1	1,8	1,2	2,0	0,6
U	2,3	5,8	2,3	5,8	1,3	3,3	0,4
Sr	211	3,5	184	3,1	127	2,1	60
Li	5,4	3,0	4,2	2,3	3,4	1,9	1,8
Ba	22	1,0	24	1,0	17	0,8	23
Mn	24	0,7	47	1,4	2,9	0,1	34

Примечания: ¹ – данные авторов, в скобках – число проб; ² – среднее содержание в реках мира [Gaillardet et al., 2004]; ³ – К_с – коэффициент концентрации относительно среднего содержания в реках мира.

нов и др., 2012]. Содержание растворенного органического вещества в речных водах бассейна колеблется в широких пределах в зависимости от свойств почв на водосборе, количества осадков, антропогенной деятельности и других факторов. В летние сезоны 2011 и 2012 г. среднее содержание $C_{\text{орг}}$ и растворенных форм металлов указанной выше ассоциации было существенно выше, чем в 2013 г., когда значительная часть тяжелых металлов и металлоидов (ТММ) могла быть мобилизована из почв и отложений в период сильных дождей, предшествовавших экспедиционным исследованиям, в результате чего среднее содержание Fe оказалось в 2,5 раза меньше среднемирового, Al и Pb – близко к нему и лишь содержание Zn сохранилось высоким.

Содержание Fe и других металлов в Селенге и большинстве ее притоков в начале июня 2012 г. было выше, чем в июле-августе 2011 г., что, по-видимому, связано с повышенным содержанием органического вещества в речных водах в период после таяния снега. Количество органического вещества в это время увеличивается вниз по течению реки [Чебыкин и др., 2012]. В этом же направлении повышается содержание Fe – от 200–500 в среднем и нижнем течении реки до 500–1000 мкг/л (иногда до 1500–2000 мкг/л) в водотоках дельты, что может быть связано с тем, что оно преимущественно находится в форме металлоорганических соединений, а также с усиленной мобилизацией Fe в переувлажненных почвах и отложениях в летний период. Еще более высокая концентрация Fe (до 2000–5000 мкг/л) установлена в непосредственной близости от основ-

ных очагов городского и горнопромышленного загрязнения (гг. Улан-Удэ, Эрдэнэт, Заамар).

Содержание растворенных форм металлов может резко увеличиваться на волне паводка. Так, 29–30 июля 2011 г. на р. Орхон в районе Хархорина после сильных ливней на фоне быстрого (в течение суток) подъема уровня на 1,5 м и расходов воды в 2 раза содержание ряда металлов многократно возросло: Fe и Al – с 30 до 3000–4000 мкг/л, Zn – с 0,5 до 7–8 мг/кг, Pb с 0,1 до 2,5 мкг/л. После прохождения паводка оно быстро снизилось до обычных значений.

Вторая ассоциация объединяет химические элементы, наиболее подвижные в речных водах бассейна Селенги, для которых преобладает ионная форма миграции: Sr, Li, U, Br, B, Mo, As. При этом если среднее содержание растворенных Br и B при относительно низких расходах воды соответствует среднему для рек мира и лишь в паводок выше него, то концентрация Sr, Li, Mo, As и U устойчиво, вне зависимости от сезона, превышает среднемировые значения. Это может быть связано как с региональной геохимической специализацией бассейна, так и с засушливостью в его монгольской части, для которой характерен повышенный фон легкоподвижных элементов. Так, в реках монгольской части бассейна содержание Br достигает 400–500, B – 50–70 мкг/л, тогда как в российской части для обоих элементов оно варьирует в пределах 10–20 мкг/л. Сходное пространственное распределение характерно для U, максимальное содержание которого в монгольских реках достигает 12–25 мкг/л, а также для других элементов ассоциации. Наибольшее содержание легкоподвижных элементов (в 2–5 раз выше среднемирового) отмечено в паводок, что можно объяснить их интенсивным выщелачиванием из почв водосборов при выпадении ливневых осадков.

При мониторинге поверхностных вод бассейна Селенги особое внимание привлекают Mo и As в связи с их повышенным региональным геохимическим фоном и наличием локальных геохимических аномалий. Месторождения Mo есть в российской (Закаменск) и монгольской (Эрдэнэт) частях бассейна. Этот металл активно мигрирует в щелочной среде степных ландшафтов [Касимов, 1988] и может накапливаться в высокой концентрации в почвах и природных водах. Среднее содержание растворенного Mo в речных водах бассейна в зависимости от сезона изменяется от 1,2 до 2,1 мкг/л (в 3–5 раз выше среднемирового) и близко к его концентрации в оз. Байкал (1,3 мкг/л) [Чебыкин и др., 2012]. В низовьях рек Туул, Орхон, Бороо и Хараа оно повышается до 2–5 мкг/л, наибольшая концентрация характерна для малых рек в районах добычи Mo: в р. Модонкуль – 4–8, а в р. Хангалынгол – 50–70 мкг/л.

Среднее содержание As в речных водах составляет 1,1–2,4 мкг/л, что в 2–4 раза выше среднемирового. В российской части бассейна содержание As обычно <2 мкг/л, в монгольской части оно повышено, особенно в районах добычи бурого угля, Au, Cu и Mo, где As содержится в виде примеси. Высокий геохимический фон As в почвах, отложениях и

речных водах в монгольской части бассейна приводит к тому, что даже небольшое дополнительное загрязнение речных вод может приводить к превышению гигиенических нормативов и риску для здоровья населения. Так, в среднем и нижнем течении р. Орхон концентрация As составляет 3–8 мкг/л и близка к ПДК_в (10 мкг/л), а на отдельных участках рек Туул и Бороо достигает 12–15 мкг/л, превышая норматив. Максимальное содержание As (>40 мкг/л) отмечено ниже хвостохранилища Эрдэнэтского ГОКа в р. Хангалынгол. Эта река небольшая, со слабым стоком, поэтому, несмотря на сильное загрязнение комплексом ТММ, она не оказывает негативного воздействия на состояние других водных объектов бассейна Селенги.

Река Модонкуль, протекающая через г. Закаменск, также испытывает сильное влияние хвостохранилищ

вольфрам-молибденового ГОКа и считается наиболее загрязненной в Бурятии [Гармаев, 2010]. По нашим данным, содержание растворенных Pb, Cd, Cu, Zn, Mn в нижнем течении р. Модонкуль на 1–2 порядка выше фоновых значений. Концентрация этих металлов в р. Джида в месте впадения р. Модонкуль (точка S311, рис. 2) в 5–10 раз больше, чем выше по течению (точки S309 и S310), однако загрязнение быстро снижается вниз по течению Джида за счет разбавления воды.

ТММ в речной взвеси. Содержание ТММ во взвешенных наносах рек весьма изменчиво и зависит от литогеохимической специализации горных пород и речных отложений, гранулометрического состава взвесей, концентрации органического вещества, техногенного воздействия на водные объекты. Среднее содержание ТММ во взвешенных на-

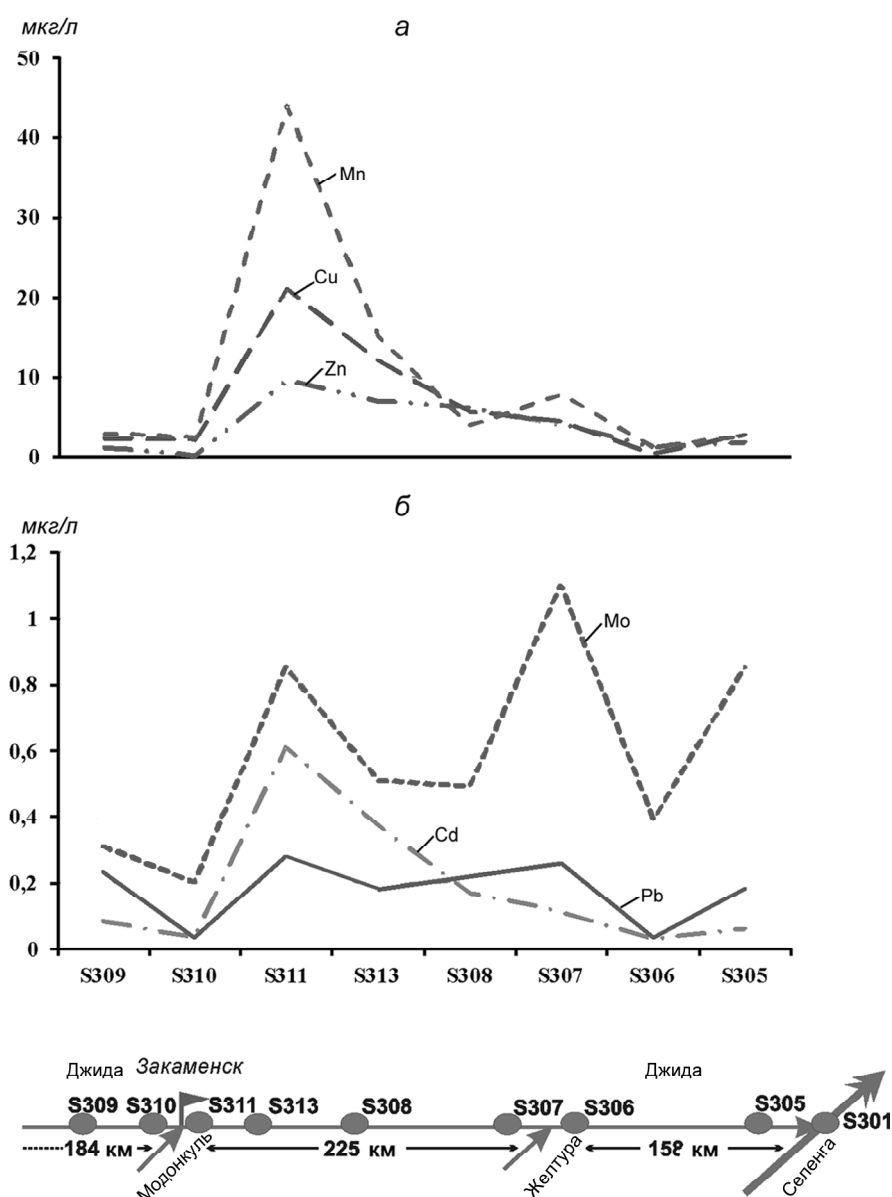


Рис. 2. Растворенные формы ТММ (мкг/л) в воде р. Джида (2013) от верховий (S310) через устье р. Модонкуль (S311) до впадения в р. Селенгу (S305): а – Cu, Zn, Mn; б – Mo, Cd, Pb

Fig. 2. Dissolved forms of HMM (mkg/l) in water of the Dzhida River (2013) from the upper reaches (S310) through the Modonkul' River mouth (S311) to the confluence with the Selenga River (S305): а – Cu, Zn, Mn; б – Mo, Cd, Pb

Таблица 3
Среднее содержание ТММ во взвешенных наносах (мг/кг)

ТММ	Бассейн Селенги			Среднее содержание в реках мира ¹	Кларки ²		
	паводок, 2011	межень, 2012	спад паводка, 2013		а	б	в
Fe	49 826	40 235	41 905	50 300	30 890	39 180	–
Al	65 277	35 451	42 377	86 300	77 440	81 500	–
Mn	2494	1651	2153	1150	527	774	–
Zn	193	77	111	130	52	67	75
Cu	51	32	53	45	14	28	27
Mo	2,3	1,4	1,4	1,8	1,4	1,1	0,6
V	130	100	113	120	53	97	106
Cr	53	62	53	85	35	92	73
As	32	15	18	14	2	4,8	5,7
Co	37	17	14	19	11,6	17,3	15
Ni	45	35	38	50	18,6	47	34
Pb	55	27	25	25	17	17	–
Cd	0,98	0,21	0,44	0,50	0,10	0,09	0,06

Примечания. Прочерк – показатель не определяли; ¹ – среднее содержание во взвешенном веществе рек мира [Савенко, 2006]; ² – среднее содержание в верхней части континентальной земной коры: а – по [Wedepohl, 1995]; б – по [Rudnick, Gao, 2003]; в – по [Hu, Gao, 2003].

носах Селенги и ее притоков по данным трех полевых сезонов приведено в табл. 3.

В межень содержание ТММ, как правило, наименьшее. В этот период взвешенные наносы Селенги обогащены относительно верхней части континентальной земной коры по [Wedepohl, 1995] As_{7,5}, Mn, Cu, Cd₂₋₃ (индексы – кларки концентрации, КК). При использовании величин кларков из работ [Rudnick, Gao, 2003; Hu, Gao, 2008] состав ассоциации выглядит несколько иначе: Cd_{3,5}, As, Mo, Mn₂₋₃. В паводок содержание многих ТММ значительно возрастает, кларки концентрации следующие: As₁₆, Cd₁₀, Mn, Cu, Zn₄₋₅, Pb, Ni, Co, V₂₋₃, по [Wedepohl, 1995], и Cd₁₆, As₆, Mo₄, Mn, Cu, Zn, Co, Pb₂₋₃, по [Rudnick, Gao, 2003; Hu, Gao, 2008].

Среднее содержание ТММ во взвешенных наносах рек мира, как правило, выше кларков верхней части континентальной земной коры, что обусловлено мелкодисперсным составом взвесей и способностью к сорбции, поэтому концентрирование элементов взвешенными наносами в бассейне Селенги при сравнении со среднемировыми значениями выражено значительно слабее: в паводок содержание As, Cd, Mo, Pb, Zn, Mn, Co лишь в 1,5–2,5 раза превышает среднемировое, а в межень ниже.

Во всех случаях к элементам с наибольшими значениями КК относятся As и Cd – приоритетные загрязнители, наблюдение за которыми обязательно во всех программах мониторинга окружающей среды. Содержание As во взвешенных наносах в значительной мере обусловлено региональными литогеохимическими особенностями территории и контролируется сорбционными процессами на границе раздела твердой и жидкой фаз. В межень среднее содержание As во взвеси Селенги (15 мг/кг) близко

к среднему содержанию в реках мира (13,8 мг/кг) [Савенко, 2006] и других реках бассейна Байкала, например в р. Баргузин (12 мг/кг) [Бобров и др., 2000]. Максимальное содержание As во взвеси Селенги установлено в районе пос. Наушки на границе России и Монголии и составляет 23 мг/кг, что связано с повышенным региональным фоном As в почвах и отложениях монгольской части бассейна. В ниже лежащих створах содержание As уменьшается почти в 2 раза. Среди притоков Селенги наибольшая концентрация отмечена в устьях Чикоя (48 мкг/г) и Джиды (33 мкг/г), что может быть связано с поставкой элемента со взвесью в их притоках – реках Киран и Модонкуль соответственно, взвешенные наносы которых обогащены As. Однако это мало отражается на содержании As во взвеси самой Селенги в связи с тем, что As частично осаждается в донных отложениях

и перемешивается с наносами с низким содержанием этого металлоида.

Высокие значения КК Cd обусловлены главным образом техногенным загрязнением, что особенно сильно проявляется на р. Модонкуль и ниже лежащем участке р. Джиды, где содержание Cd во взвешенных наносах составляет >20 мг/кг, т.е. в 40 раз больше среднемирового. На других участках рек, в том числе подверженных техногенному воздействию, содержание Cd, как правило, не превышает 1 мг/кг.

Тенденция к увеличению содержания Mo, Pb, Zn, Mn, Co, Cd, As при прохождении паводка, очевидно, обусловлена смывом тонких частиц, загрязненных ТММ, при выпадении ливневых осадков на водосборах. Мутность речных вод, как отмечено выше, в паводок резко возрастает.

Суммарный показатель загрязнения взвешенных наносов Z_c (рис. 3) в российской части бассейна, как правило, <32, что в целом свидетельствует о низком уровне загрязнения. Близкие величины Z_c характерны для большинства рек монгольской части бассейна, однако в ряде случаев этот показатель возрастает до 32–64 и даже до 64–128, что соответствует умеренному и высокому уровню загрязнения. Особенно высокое значение Z_c >128 отмечено вблизи главных источников загрязнения – золотых приисков на р. Хараа, а также месторождений цветных металлов в районе Эрдэнэта (р. Хангалынгол) и Закаменска (р. Модонкуль).

Соотношение форм миграции тяжелых металлов и металлоидов. Многие речные бассейны, в том числе бассейн Селенги, испытывают техногенное воздействие, особенно усилившееся в последние десятилетия. Сброс загрязненных вод в реки приводит к повышению концентрации многих хими-

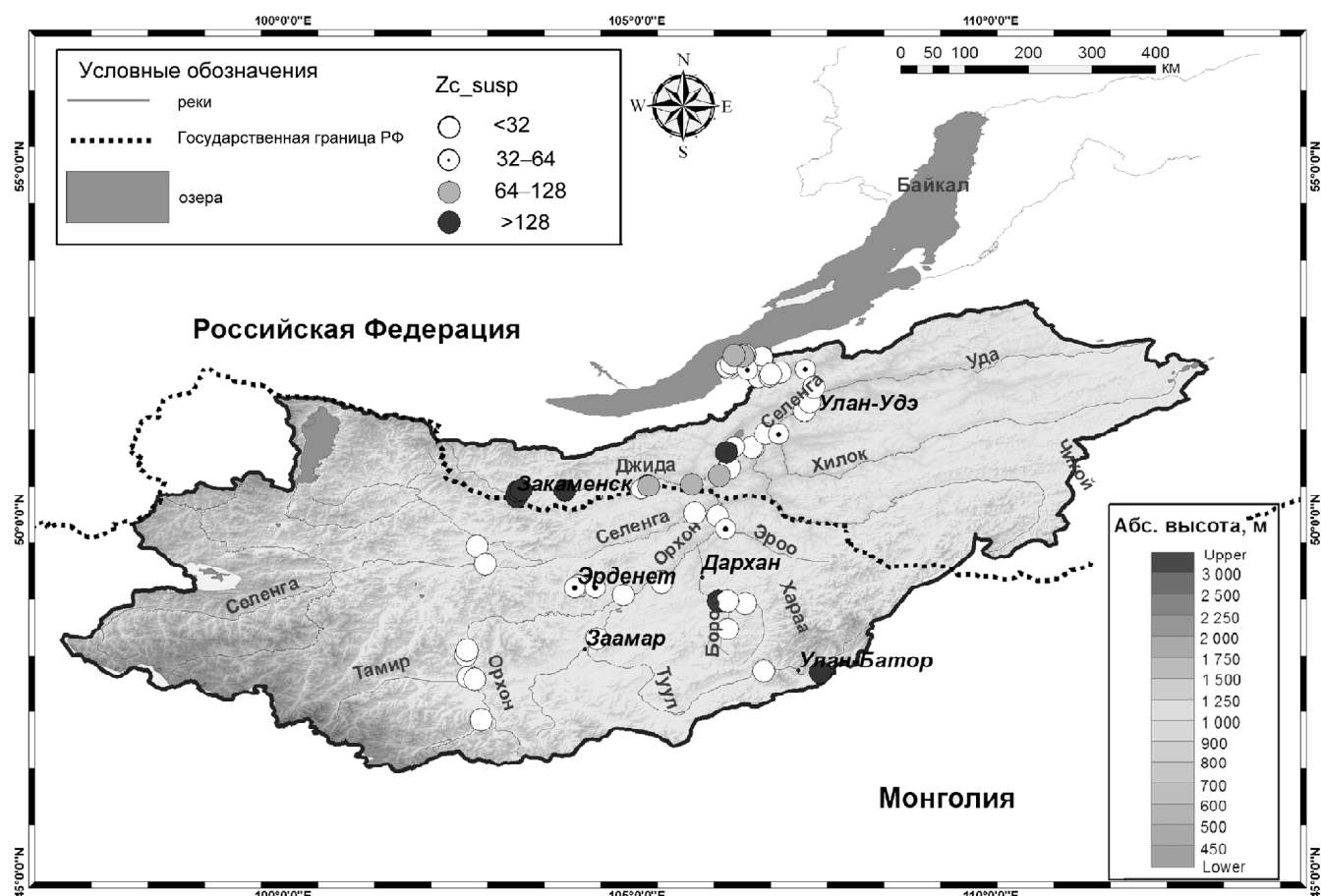


Рис. 3. Суммарный показатель загрязнения взвешенных наносов (паводок, июль-август 2011 г.)

Fig. 3. Total index of the suspended matter pollution (flood July-August 2011)

ческих элементов, а также увеличению их подвижности, что проявляется в повышении содержания непрочносорбированных форм, связанных с аморфными гидроксидами железа, а также других форм, способных при изменении условий миграции переходить в растворенное состояние и вызывать вторичное загрязнение речных вод. В связи с этим проблема соотношения форм миграции химических элементов в поверхностных водах привлекает внимание многих исследователей.

Принято считать, что преобладающая форма миграции ТММ в речных водах – взвешенная, на ее долю может приходиться до 90–99% от общей речной транспортировки металлов [Лисицын, Гордеев, 1974; Martin, Maybeck, 1979; Гордеев, 2012], что характерно для горных рек с высоким содержанием взвешенных наносов. На равнинных реках с низкой мутностью соотношение форм принципиально иное, что показано авторами статьи на примере дельты Волги [Lychagin et al., 2015], где в речных водах на долю растворенных форм Zn и Cd приходится 60–80% от их общего содержания. Взвешенная форма преобладает для Pb, Ni, Cu и Mn, однако ее доля не превышает 55–80%, что существенно ниже среднемировых оценок (>90%).

В верхнем течении рек бассейна Селенги, берущих начало в горах, преобладает взвешенная форма миграции ТММ. Так, в верховьях р. Туул доля

взвешенных форм Al, Fe, Mn составляет ~90% [Chalov et al., 2015]. Вниз по течению увеличивается доля растворенных форм, что достаточно ярко проявилось в среднем течении Селенги вблизи границы России и Монголии в июне 2012 г. (рис. 4). Из-за очень небольшой мутности речных вод в период межени относительное содержание растворенных форм большей части ТММ превысило 80%, причем не только подвижных в щелочной среде Mo, As, Cr и V, но и менее миграционно-активных Fe, Pb и Ni; доля растворенных форм Al, Mn, Zn, Cu и Co составила 60–80%.

Летний паводок 2011 г., связанный с сильными ливнями в верхней части бассейна Селенги, обусловил экстремально высокие значения мутности воды в р. Орхон и резкое увеличение доли взвешенных форм миграции ТММ. В средней части бассейна Селенги (рис. 4) влияние паводка было существенно меньше, и хотя мутность вод здесь тоже несколько возросла, доля растворенных форм осталась преобладающей для Mo, As и Zn (>80%), Cd, Cr и Ni (60–70%). Лишь для Fe, Al, Mn, Pb, Co и V она снизилась до 20–30%.

Влияние паводков, формирующихся в верхней части рассматриваемого бассейна, на формы миграции ТММ уменьшается вниз по течению, поэтому в дельте Селенги соотношение растворенных и взвешенных форм ТММ в течение года изменяется мало (рис. 4). Это связано с перераспределением

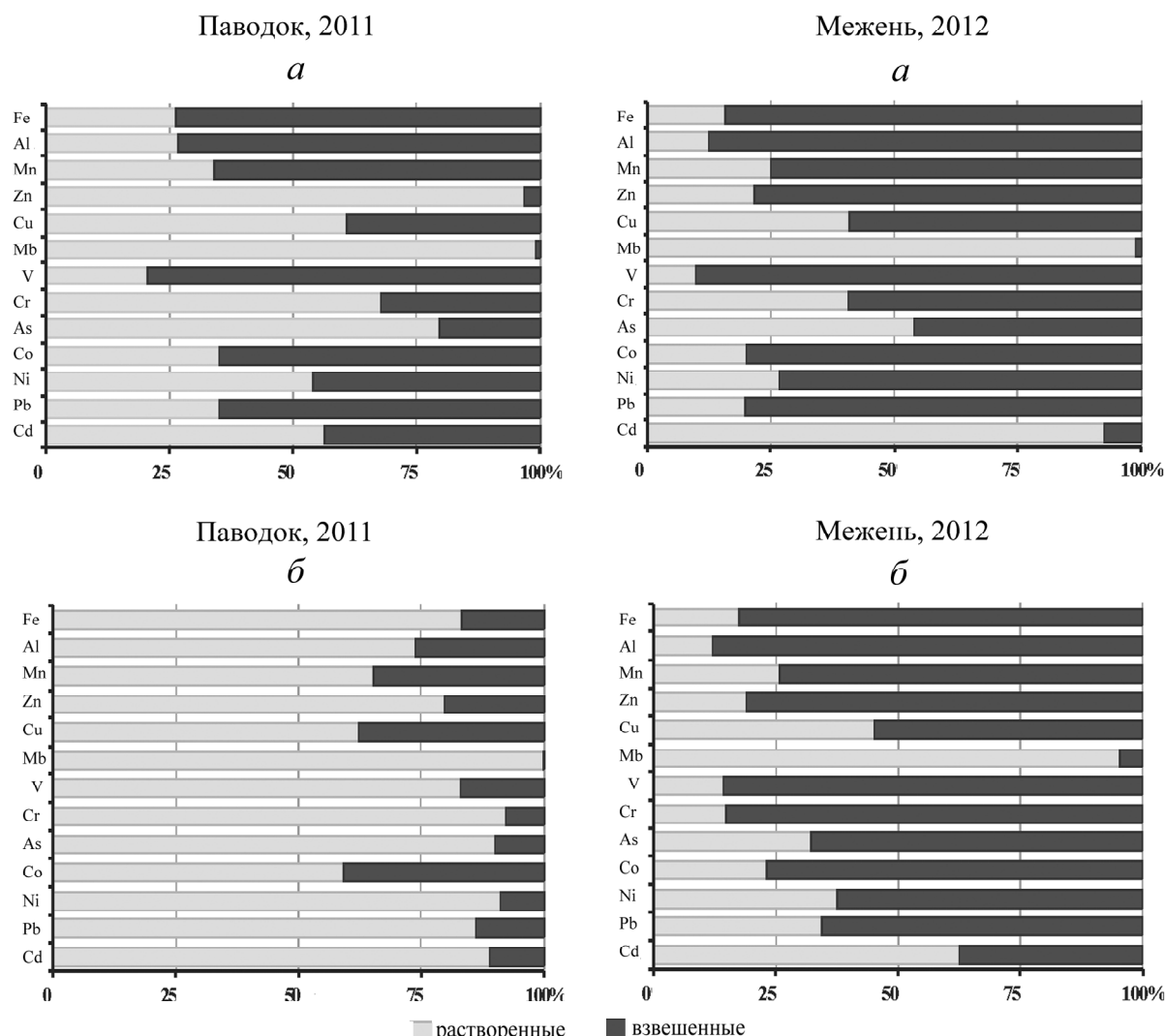


Рис. 4. Растворенные и взвешенные формы ТММ в р Селенга в период паводка 2011 г. и межени 2012 г.: а – граница России и Монголии – пос. Наушки; б – дельта Селенги

Fig. 4. Dissolved and suspended forms of HMMs in the Selenga River during flood 2011 and low-water 2012: а – Russian-Mongolian border, Naushki settlement; б – Selenga River delta

стока по дельтовым протокам, снижением гидродинамической активности потока и осаждением значительной части взвешенных наносов. В паводок и межень доля растворенных форм Mo и Cd доходила до $\geq 90\%$, As, Cu и Ni – $30\text{--}50\%$, остальных элементов – $<30\%$ (за исключением Cr и Pb).

Потоки тяжелых металлов и металлоидов в бассейне Селенги. Для пространственной характеристики транспортировки ТММ в бассейне Селенги в разные гидрологические сезоны рассчитаны потоки их растворенных и взвешенных форм, что позволило построить около 100 моделей геохимических потоков для 25 химических элементов. Особенности формирования потоков рассмотрим на примере Cd и Cu (рис. 5) в период паводка, обусловленного сильными дождями в верхней части бассейна в июле-августе 2011 г.

Кадмий – один из наиболее токсичных тяжелых металлов, он поступает в аквальные системы от разнообразных источников загрязнения: производства и обработки цветных металлов, автотранспорта, предприятий теплоэнергетики и др. Медь, хотя и

более распространена, но менее токсична и в целом менее подвижна в наземных и аквальных ландшафтах. В водных объектах доля растворенных форм Cd может составлять $50\text{--}70\%$ от общего содержания, что существенно выше, чем у Cu и многих других тяжелых металлов [Перельман, Касимов, 1999]. Это подтверждается нашими данными для бассейна Селенги, где на растворенные формы Cd приходится от 60 до 90% от общего баланса форм, а для Cu – не более $40\text{--}60\%$ (рис. 4).

В июле 2011 г. самый сильный паводок был в верховьях р. Орхон, где резкий подъем уровня воды сопровождался многократным увеличением ее мутности. Вследствие этого в верхнем течении Орхона поток взвешенного Cd почти в 50 раз превысил поток растворенного ($1,87$ кг/сут и $0,04$ кг/сут соответственно, рис. 5). Вниз по течению к границе России и Монголии поток растворенного Cd постепенно увеличивался до $0,11$ кг/сут, а ниже впадения Орхона в Селенгу – до $0,59$ кг/сут. В то же время поток взвешенного Cd быстро снижался в связи с осаждени-

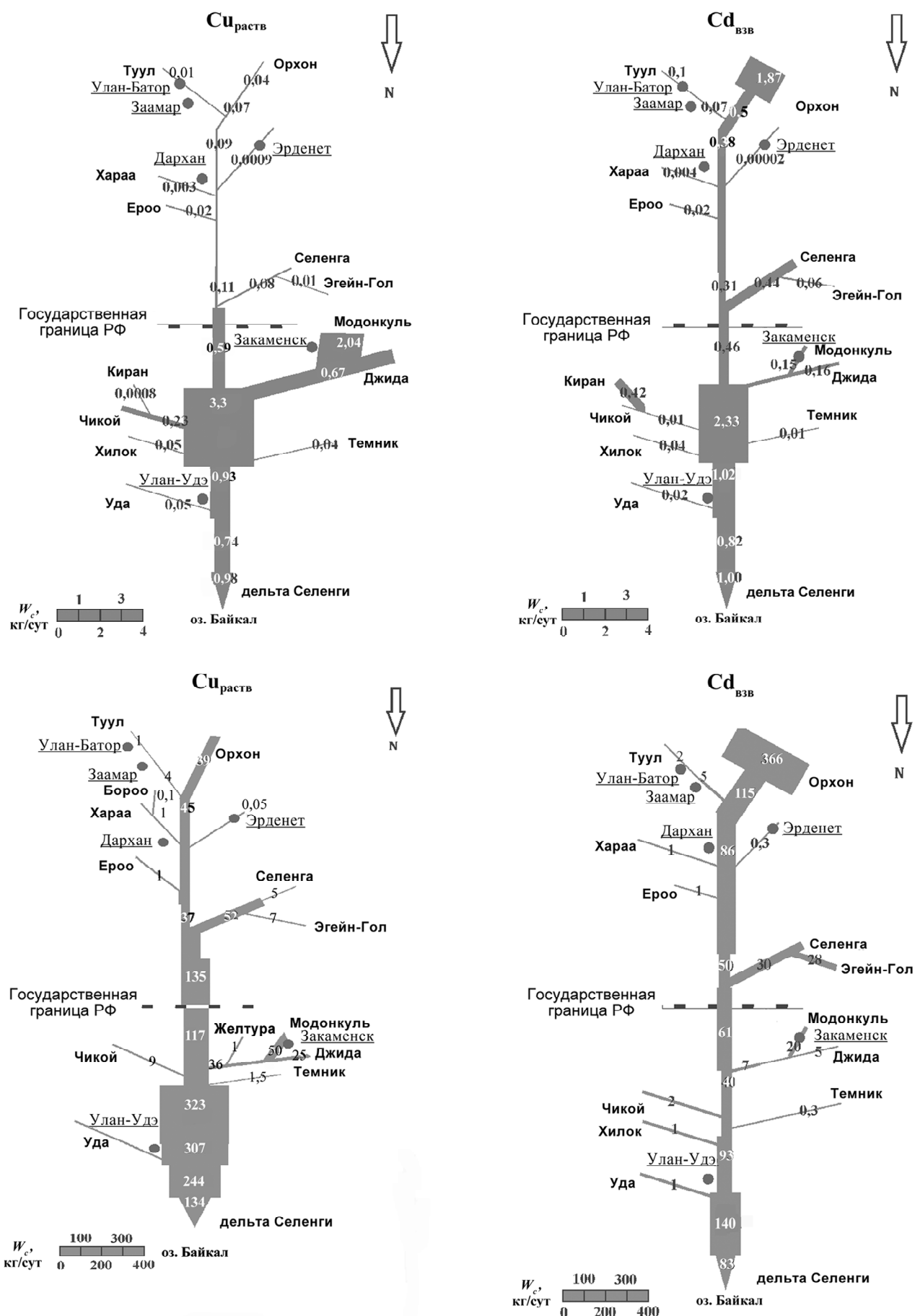


Рис. 5. Геохимические потоки Cd и Cu (кг/сут) в период летнего паводка, июль 2011 г.

Fig. 5. Geochemical fluxes of Cd and Cu (kg/day) during the summer flood, July 2011

ем большей части твердых наносов – уже у слияния с р. Туул он уменьшился до 0,51 кг/сут, а выше впадения Орхона в Селенгу до 0,31 кг/сут. Ниже слияния с Селенгой поток немного возрос и у границы составил 0,46 кг/сут. В российской части бассейна наибольшее влияние на поток Cd оказала р. Джидда, после слияния с которой он возрос до 2–3 кг/сут. В нижней части бассейна нет крупных источников Cd, воды Селенги разбавляются водами притоков, Cd частично осаждается в донных отложениях, поэтому в дельту Селенги поступает около 1 кг/сут как растворенного, так и взвешенного Cd.

Поток взвешенной Cu в верховьях Орхона тоже значительно (почти в 10 раз) превышал поток растворенной формы: 366 и 39 кг/сут соответственно. На границе России и Монголии поток взвешенной формы Cu снизился до 61, а растворенной – увеличился до 135 кг/сут. Вниз по течению поток растворенной меди ступенчато возрастал по мере увеличения объема стока Селенги ниже впадения крупных притоков: в районе Улан-Удэ он увеличился до 300 кг/сут, в дельту Селенги поступало 250 кг/сут Cu, причем ~50% этого количества достигло оз. Байкал. На поток взвешенной Cu наибольшее влияние оказали г. Улан-Удэ и р. Уда, ниже слияния с которой поток Cu возрос с 93 до 140 кг/сут.

Влияние г. Улан-Удэ на потоки ТММ проявляется как в паводок, так и в межень. Для As, Cr, V, U отмечено их увеличение в 1,5–2 раза, для Mn, Ni, Zn, V, Co и Fe – в 3–4 раза, для Pb и Cu – в 5–10 раз. Увеличение потоков растворенных ТММ вниз по течению отмечалось до самой дельты Селенги. Потоки взвешенных форм в верхней части дельты несколько снизились в связи с частичным осаждением взвешенных наносов.

Таким образом, в паводок геохимические потоки растворенных форм Cd и Cu характеризовались общей тенденцией к увеличению по направлению к дельте Селенги, что обусловлено главным образом повышением водности реки. В верхней части бассейна отмечались экстремально высокие потоки взвешенных форм, что определяется выпадением ливневых осадков; потоки взвешенных форм быстро уменьшались вниз по течению в связи с осаждением наносов при уменьшении расходов воды. В нижней части бассейна Селенги потоки снова увеличивались в связи с впадением крупных притоков. Техногенное воздействие сильнее всего проявилось в существенном увеличении потоков взвешенного и растворенного Cd ниже впадения р. Джидда.

Выводы:

– региональный бассейновый анализ формирования стока воды, взвешенных наносов и содержащихся в них веществ, выполненный в условиях низкой плотности гидрометрической сети на основе результатов экспедиционных исследований и математического моделирования, может служить мето-

дической основой оценки современного состояния водных объектов и переноса поллютантов в системе Селенга–Байкал;

– количественные параметры транспортировки взвешенных наносов в бассейне Селенги во многом определяются фазой водного режима. В межень реки имеют низкую мутность, продольное увеличение расходов взвешенных наносов и содержания в них тонкодисперсных частиц. Вклад половодья и паводков в транспортировку взвешенных наносов составляет от 52 до 99% годового стока, при этом на крупных реках доля стока наносов для года средней водности соответствует средней многолетней доле стока воды за теплый период, на малых реках роль периода повышенной водности в годовом стоке взвешенных наносов максимальна;

– разнообразие природных условий водосборного бассейна в сочетании с техногенным воздействием определяет уровни содержания и пространственные различия распределения ТММ в речных водах. Реки бассейна Селенги обогащены относительно среднего содержания в реках мира растворенными Sr, Li, U, Br, B, Mo, As, для которых преобладает ионная форма миграции, а также Fe, Al, Zn и Pb, вероятно, мигрирующими в форме комплексных соединений с органическим веществом. Во взвешенных наносах Селенги и ее притоков повышено содержание As, Cd, Mo, Pb, Zn, Mn, Co, что обусловлено как природными (As), так техногенными (Cd, Mo, Pb) факторами;

– анализ соотношения форм миграции химических элементов в речных водах выявил для большинства ТММ преобладание взвешенных форм в верхней части бассейна и растворенных форм в средней и нижней. Доля взвешенных форм миграции резко возрастает при прохождении паводков, особенно в верховьях рек; в нижней части бассейна влияние паводков на соотношение форм уменьшается, что особенно заметно в дельте Селенги;

– геохимические потоки растворенных форм ТММ в паводок увеличивались по направлению к дельте Селенги по мере возрастания водности реки. В верхней части бассейна отмечены экстремально высокие потоки взвешенных форм, обусловленные выпадением ливневых осадков и быстро уменьшающиеся вниз по течению благодаря осаждению наносов. В нижней части бассейна потоки снова возрастают в связи с впадением крупных притоков. Наибольшие техногенные изменения потоков характерны для малых рек (Модонкуль, Хангалынгол, Туул, Уда и др.), испытывающих воздействие городов и объектов горнодобывающей промышленности. Выявлено экстремально высокое загрязнение р. Модонкуль Cd и другими металлами, существенно влияющее на геохимические потоки ТММ в р. Джидда вплоть до ее впадения в Селенгу.

Благодарности. Полевые работы выполнены в рамках проекта РГО «Комплексная экспедиция Селенга–Байкал» (2011–2013 гг.). Обработка полученных материалов осуществлялась за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14–27–00083).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеевский Н.И. Формирование и движение речных наносов. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1998. 202 с.
- Алексеевский Н.И., Белозерова Е.В., Касимов Н.С., Чалов С.Р. Пространственная изменчивость характеристик стока взвешенных наносов в бассейне Селенги в период дождевых паводков // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2013. № 3. С. 60–65.
- Башенхаева Н.В., Синюкович В.Н., Сорокикова Л.М., Ходжер Т.В. Органическое вещество в воде реки Селенги // География и природные ресурсы. 2006. № 1. С. 47–54.
- Бережных Т.В., Марченко О.Ю., Абасов Н.В., Мордвинов В.И. Изменение летней циркуляции атмосферы над Восточной Азией и формирование длительных маловодных периодов в бассейне реки Селенги // География и природные ресурсы. 2012. № 3. С. 61–68.
- Бобров В.А., Гранина Л.З., Колмогоров Ю.П., Ходжер Т.В. Микроэлементный состав эоловой и речной взвеси Байкала: Мат-лы XIII Росс. конф. по использованию синхротронного излучения (Новосибирск, 17–21 июля 2000 г.). Новосибирск, 2000. С. 251–254.
- Гармаев Е.Ж. Сток рек бассейна озера Байкал. Улан-Удэ: Изд-во Бур. ун-та, 2010. 269 с.
- Герасимова М.И., Касимов Н.С., Горбунова И.А. и др. Ландшафтно-геохимическое районирование бассейна Селенги // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2014. № 6. С. 66–72.
- Глазовская М.А. Геохимия природных и техногенных ландшафтов СССР. М.: Высшая школа, 1988. 350 с.
- Гордеев В.В. Геохимия системы река-море. М.: ИП Матушкина И.И., 2012. 452 с.
- Касимов Н.С. Геохимия степных и пустынных ландшафтов. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1988. 254 с.
- Корытный Л.М. Бассейновая концепция в природопользовании. Иркутск: Изд-во Института географии СО РАН, 2001. 163 с.
- Крайнов С.Р., Рыженко Б.Н., Швеиц В.М. Геохимия подземных вод: теоретические, прикладные и экологические аспекты. М.: ЦентрЛитНефтеГаз, 2012. 672 с.
- Лисицын А.П., Гордеев В.В. О химическом составе взвеси и воды морей и океанов // Литология и полезные ископаемые. 1974. № 3. С. 38–58.
- Огуреева Г.Н., Микляева И.М., Бочарников М.В. Современное состояние и тенденции изменения горных экосистем Монголии // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2012. № 5. С. 28–34.
- Перельман А.И. Геохимия ландшафта. М.: Высшая школа, 1975. 341 с.
- Перельман А.И., Касимов Н.С. Геохимия ландшафта. М.: Астрель-2000, 1999. 763 с.
- Потемкина Т.Г. Тенденции формирования стока наносов основных притоков озера Байкал в XX и начале XXI столетия // Метеорология и гидрология. 2011. № 12. С. 63–71.
- Савенко В.С. Химический состав взвешенных наносов рек мира. М.: ГЕОС, 2006. 175 с.
- Чебыкин Е.П., Сорокикова Л.М., Томберг И.В. и др. Современное состояние вод р. Селенги на территории России по главным компонентам и следовым элементам // Химия в интересах устойчивого развития. 2012. № 5. С. 613–631.
- Шимараев М.Н., Старыгина Л.Н. Зональная циркуляция атмосферы, климат и гидрологические процессы на Байкале (1968–2007 гг.) // География и природные ресурсы. 2010. № 3. С. 62–68.
- Audry S., Schäfer J., Blanc G. et al. Anthropogenic components of heavy metals (Cd, Zn, Cu, Pb) budgets in the Lot-Garonne fluvial system (France) // Appl. Geochemistry. 2004. Vol. 19. P. 769–786.
- Chalov S.R., Jarsjö J., Kasimov N. et al. Spatio-temporal variation of sediment transport in the Selenga River Basin, Mongolia and Russia // Environm. Earth Sci. 2015. Vol. 73, Iss. 2. P. 663–680.
- Chalov S., Kasimov N., Lychagin M. et al. Water resources assessment of the Selenga-Baikal river system // Geoöko. 2013. Vol. XXXIV. P. 77–102.
- Gaillardet J., Viers J., Dupre B. Trace elements in river waters // Treatise on Geochemistry. Vol. 5 / Ed by H.D. Holland, K.K. Turekian. Amsterdam: Elsevier, 2004. P. 225–272.
- Garcia-Ruiz J.M., Regues D., Alvera B. et al. Flood generation and sediment transport in experimental catchments affected by land use changes in the central Pyrenees // J. Hydrology. 2008. Vol. 356. P. 245–260.
- Horowitz A.J., Stephens V.C. The effects of land use on fluvial sediment chemistry for the conterminous U.S. – results from the first cycle of the NAWQA Program: trace and major elements, phosphorus, carbon, and sulfur // Science of Total Environ. 2008. Vol. 400. P. 290–314.
- Hu Z., Gao S. Upper crustal abundances of trace elements: A revision and update // Chem. Geology. 2008. Vol. 253. P. 205–221.
- Inam E., Khantotong S., Kim K.W. et al. Geochemical distribution of trace element concentrations in the vicinity of Boroo gold mine, Selenge Province, Mongolia // Environm. Geochem. and Health. 2011. Vol. 33. P. 57–69.
- Karthe D., Kasimov N., Chalov S. et al. Integrating multi-scale data for the assessment of water availability and quality in the Kharaa-Orkhon-Selenga river system // Geography, Environment, Sustainability. 2014. Vol. 3(7). P. 65–86.
- Lychagin M.Y., Tkachenko A.N., Kasimov N.S., Kroonenberg S.B. Heavy metals in the water, plants, and bottom sediments of the Volga river mouth area // J. Coastal Res., 2015. Vol. 31. P. 859–868.
- Martin J.M., Maybeck M. Elemental mass-balance of material carried by world major rivers // Marine Chemistry. 1979. Vol. 7. P. 173–206.
- Olefeldt D., Roulet N., Giesler R., Persson A. Total waterborne carbon export and DOC composition from ten nested subarctic peatland catchments – importance of peatland cover, groundwater influence, and inter-annual variability of precipitation patterns // Hydrological Processes. 2013. Vol. 27(16). P. 2280–2294.
- Ollivier P., Radakovitch O., Hamelin B. Major and trace element partition and fluxes in the Rhône River // Chem. Geology. 2011. Vol. 285. P. 15–31.
- Rudnick R.L., Gao S. Composition of the continental crust // Treatise on geochemistry. Vol. 3 / Ed by H.D. Holland, K.K. Turekian. Amsterdam: Elsevier, 2003. P. 1–64.
- Thorslund J., Jarsjö J., Chalov S.R., Belozeroва E.V. Gold mining impact on riverine heavy metal transport in a sparsely monitored region: the upper Lake Baikal Basin case // J. Environ. Monitoring. 2012. Vol. 14. P. 2780–2792.
- Wedepohl K.H. The composition of the continental crust // Geochim. et Cosmochim. Acta. 1995. Vol. 59. P. 1217–1232.

Поступила в редакцию 16.03.2016
Принята к публикации 16.03.2016

N.S. Kasimov¹, M.Yu. Lychagin², S.R. Chalov³, G.L. Shinkareva⁴,
M.P. Pashkina⁵, A.O. Romanchenko⁶, E.V. Promakhova⁷

CATCHMENT BASED ANALYSIS OF MATTER FLOWS IN THE SELENGA-BAIKAL SYSTEM

A regional basinwide assessment of the formation of the water and suspended matter runoff was carried out for the Selenga River – Baikal Lake system. It is based on the results of integrated hydrological and geochemical research of more than 100 locations within Russia and Mongolia performed by the authors in 2011–2013 using the unified methodology during various hydrological periods. It is shown that the quantitative parameters of the suspended sediment transport are largely determined by the seasonal hydrology. Contribution of floods in the suspended sediment transport ranges from 52% of annual runoff for the large rivers up to 99% for the small ones.

Chemical composition of 400 samples of the water and suspended sediment was analyzed by ICP-MS / ICP-AES method. The obtained results demonstrate that Selenga River basin is enriched relative to the average content in the World Rivers by dissolved Sr, Li, U, Br, B, Mo, As, migrating predominantly in the ionic form, as well as by Fe, Al, Zn and Pb, migrating in the form of complexes with organic matter. Suspended sediments of the Selenga River and its tributaries are enriched with As, Cd, Mo, Pb, Zn, Mn, Co, which is due to both the geochemical specialization of the region (As) and the technogenic influence (Cd, Mo, Pb).

Analysis of particulate/dissolved modes of chemical elements in river water showed the prevalence of particulate modes of most heavy metals and metalloids (HMM) in the upper part of the basin and dissolved ones in the middle and lower parts. The share of suspended forms of migration increases dramatically during the floods, especially in the upper reaches of the rivers; in the lower part of the basin the impact of floods on the ratio of forms decreases, which is especially noticeable in the Selenga delta.

During the floods geochemical fluxes of dissolved HMM increased towards the Selenga delta with increasing water runoff. Extremely high flows of suspended forms caused by heavy rainfall were determined in the upper part of the basin that rapidly decreased downstream due to sedimentation. In the lower part of the basin, the flows increased again due to the confluence of major tributaries. The largest anthropogenic changes in fluxes are typical for small rivers (Modonkul, Hangalyngol, Tuul, Uda et al.), impacted by the towns and mining facilities. Extremely high pollution by Cd and other metals was revealed for the Modonkul River that is significantly affecting the geochemical flows of HMM in the Dzhida River up to its confluence with the Selenga River.

Keywords: basinwide analysis, Selenga River, Baikal Lake, geochemical fluxes, migration modes, suspended matter, heavy metals and metalloids.

Acknowledgements. Fieldwork was carried out within the framework of the Russian Geographical Society project «Complex Expedition Selenga-Baikal» (2011–2013). The data analysis and treatment were financially supported by the Russian Science Foundation (project N 14-27-00083).

REFERENCES

- Alexeevsky N.I. Formirovanie i dvizhenie rechnyh nanosov [The formation and movement of river sediments], Moscow, Izdatel'stvo Moskovskogo Universiteta, 1998, 202 p. (in Russian).
- Alexeevsky N.I., Belozeroва E.V., Kasimov N.S., Chalov S.R. Prostranstvennaya izmenchivost' harakteristik stoka vzheshennyh nanosov v bassejne Selengi v period dozhdnykh pavodkov [Spatial variability of suspended sediment characteristics in the Selenga River Basin during rain floods], Vestnik Moskovskogo Universiteta, seria 5, Geografiya, 2013, no 3, pp. 60–65 (in Russian).
- Audry S., Schäfer J., Blanc G. et al. Anthropogenic components of heavy metals (Cd, Zn, Cu, Pb) budgets in the Lot-Garonne fluvial system (France) // Appl. Geochem. 2004. Vol. 19. P. 769–786.
- Bashenbaeva N.V., Sinjukovich V.N., Sorokovikova L.M., Hodzher T.V. Organicheskoe veshchestvo v vode reki Selengi [Organic matter in the Selenga River water], Geografija i prirodnye resursy, 2006, no 1, pp. 47–54 (in Russian).
- Bereznykh T.V., Marchenko O.Ju., Abasov N.V., Mordvinov V.I. Izmenenie letnej cirkuljacii atmosfery nad Vostochnoj Aziej i
- ¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography Department of Landscape Geochemistry and Soil Geography, Head of the Department, Faculty President, Academician RAS, D.Sc. in Geography; e-mail: secretary@geogr.msu.ru
- ² Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Landscape Geochemistry and Soil Geography, Associate Professor, PhD in Geography; e-mail: lychagin@geogr.msu.ru
- ³ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Terrestrial Hydrology, Senior Research Scientist, PhD in Geography; e-mail: srchalov@rambler.ru
- ⁴ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Landscape Geochemistry and Soil Geography, Junior Research Scientist; e-mail: galina.shinkareva@gmail.com
- ⁵ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Terrestrial Hydrology, Student; e-mail: m.pashkina.msu@gmail.com
- ⁶ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Terrestrial Hydrology, PhD Student; e-mail: a.o.romanchenko@gmail.com
- ⁷ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Makkaveev Laboratory of Soil Erosion and Channel Processes, Junior Research Scientist; e-mail: promakhova@gmail.com

formirovanie dlitel'nyh malovodnyh periodov v bassejne reki Selengi [Change of the summer atmospheric circulation over Eastern Asia and the formation of long periods of low water in the Selenga River Basin], *Geografija i prirodnye resursy*, 2012, no 3, pp. 61–68 (in Russian).

Bobrov V.A., Granina L.Z., Kolmogorov Ju.P., Hodzher T.V. Mikrojelementnyj sostav jeolovoj i rečnoj vzvesi Bajkala [Trace elements composition of aeolian and fluvial suspended matter of the Lake Baikal], *Materialy XIII Rossijskoj konfkonferencii po ispol'zovaniju sinhrotronnogo izluchenija* (Novosibirsk, July 17–21, 2000), Novosibirsk, 2000, pp. 251–254 (in Russian).

Chalov S., Kasimov N., Lychagin M., Alexeevsky N. et al. Water resources assessment of the Selenga-Baikal river system // *Geoöko*. 2013. Vol. 34. P. 77–102.

Chalov S.R., Jarsjö J., Kasimov N. et al. Spatio-temporal variation of sediment transport in the Selenga River Basin, Mongolia and Russia // *Environm. Earth Sci.* 2015. Vol. 73, Iss. 2. P. 663–680.

Chebykin E.P., Sorokovikova L.M., Tomberg I.V. et al. Sovremennoe sostojanie vod r. Selengi na territorii Rossii po glavnym komponentam i sledovym jelementam [The current state of water of the Selenga River in Russia by main components and trace elements], *Himija v interesah ustojchivogo razvitija*, 2012, no 5, pp. 613–631 (in Russian).

Gaillardet J., Viers J., Dupre B. Trace Elements in River Waters // *Treatise on Geochemistry*. Vol. 5 / Ed by H.D. Holland, K.K. Turekian. Amsterdam: Elsevier, 2004. P. 225–272.

Garcia-Ruiz J.M., Regues D., Alvera B. et al. Flood generation and sediment transport in experimental catchments affected by land use changes in the central Pyrenees // *J. Hydrology*. 2008. Vol. 356. P. 245–260.

Garmaev E.Zh. Stok rek bassejna ozera Bajkal [Outflow of the rivers of the Lake Baikal basin], Ulan-Ude, Izdatel'stvo Burjatskogo universiteta, 2010, 269 p. (in Russian).

Gerasimova M.I., Kasimov N.S., Gorbunova I.A. et al. Landshaftno-geohimicheskoe rajonirovanie bassejna Selengi [Landscape-geochemical zoning of the Selenga Basin], *Vestnik Moskovskogo Unversiteta, seria 5, Geografiya*, 2014, no 6, pp. 66–72 (in Russian).

Glazovskaja M.A. Geohimija prirodnyh i tehnogennyh landshaftov SSSR [Geochemistry of natural and technogenic landscapes of the USSR.], Moscow, Vysshaja shkola, 1988, 350 p. (in Russian).

Gordeev V.V. Geohimija sistemy reka-more [Geochemistry of the river-sea system], Moscow, IP Matushkina I.I., 2012, 452 p. (in Russian).

Horowitz A.J., Stephens V.C. The effects of land use on fluvial sediment chemistry for the conterminous U.S. – results from the first cycle of the NAWQA Program: trace and major elements, phosphorus, carbon, and sulfur // *Scie. Total Environm.* 2008. Vol. 400. P. 290–314.

Hu Z., Gao S. Upper crustal abundances of trace elements: A revision and update // *Chem. Geology*. 2008. Vol. 253. P. 205–221.

Inam E., Khantotong S., Kim K.W. et al. Geochemical distribution of trace element concentrations in the vicinity of Boroo gold mine, Selenge Province, Mongolia // *Environm. Geochem. and Health*. 2011. Vol. 33. P. 57–69.

Karthe D., Kasimov N., Chalov S. et al. Integrating multi-scale data for the assessment of water availability and quality in the Kharaa-Orkhon-Selenga river system // *Geography, Environment, Sustainability*. 2014. Vol. 3(7). P. 65–86.

Kasimov N.S. Geohimija stepnyh i pustynnyh landshaftov [Geochemistry of the steppe and desert landscapes], Moscow, Izdatel'stvo Moskovskogo Universtiteta, 1988, 254 p. (in Russian).

Korytnyj L.M. Bassejnovaja koncepcija v prirodopol'zovanii [River Basin concept in environmental management], Irkutsk, Izdatel'stvo Instituta geografii SO RAN, 2001, 163 p. (in Russian).

Krajnov S.R., Ryzhenko B.N., Shvec V.M. Geohimija podzemnyh vod: teoreticheskie, prikladnye i jekologicheskie aspekty [Groundwater neochemistry: theoretical, applied and environmental aspects], Moscow, CentrLitNefteGaz, 2012, 672 p. (in Russian).

Lisicyn A.P., Gordeev V.V. O himicheskom sostave vzvesi i vody morej i okeanov [About the chemical composition of suspended matter and water of the seas and oceans], *Litologija i poleznye iskopaemye*, 1974, no 3, pp. 38–58 (in Russian).

Lychagin M.Y., Tkachenko A.N., Kasimov N.S., Kroonenberg S.B. Heavy metals in the water, plants, and bottom sediments of the Volga river mouth area // *J. Coastal Res.* 2015. Vol. 31. P. 859–868.

Martin J.M., Maybeck M. Elemental mass-balance of material carried by world major rivers // *Marine Chemistry*. 1979. Vol. 7. P. 173–206.

Ogureeva G.N., Mikljaeva I.M., Bocharnikov M.V. Sovremennoe sostojanie i tendencii izmenenija gornyh jekosistem Mongolii [The current state and tendencies of change of mountain ecosystems of Mongolia], *Vestnik Moskovskogo Unversiteta, seria 5, Geografiya*, 2012, no 5, pp. 28–34 (in Russian).

Olefeldt D., Roulet N., Giesler R., Persson A. Total waterborne carbon export and DOC composition from ten nested subarctic peatland catchments – importance of peatland cover, groundwater influence, and inter-annual variability of precipitation patterns // *Hydrol. Processes*. 2013. Vol. 27(16). P. 2280–2294.

Ollivier P., Radakovitch O., Hamelin B. Major and trace element partition and fluxes in the Rhône River // *Chem. Geology*. 2011. Vol. 285. P. 15–31.

Perel'man A.I. Geohimija landshafta [Landscape geochemistry], Moscow, Vysshaja shkola, 1975, 341 p. (in Russian).

Perel'man A.I., Kasimov N.S. Geohimija landshafta [Landscape geochemistry], Moscow, Astreja-2000, 1999, 763 p. (in Russian).

Potemkina T.G. Tendencii formirovanija stoka nanosov osnovnyh pritokov ozera Bajkal v XX i nachale XXI stoletija [Trends in the formation of sediment load of the Lake Baikal main tributaries in the XX and the beginning of XXI centuries], *Meteorologija i gidrologija*, 2011, no 12, pp. 63–71 (in Russian).

Rudnick R.L., Gao S. Composition of the continental crust // *Treatise on geochemistry*. Vol. 3 / Ed by H.D. Holland, K.K. Turekian. Amsterdam: Elsevier, 2003. P. 1–64.

Savenko V.S. Himicheskij sostav vzveshennyh nanosov rek mira [Chemical composition of suspended sediment of rivers of the world], Moscow, GEOS, 2006, 175 p. (in Russian).

Shimaraev M.N., Sarygina L.N. Zonal'naja cirkuljacija atmosfery, klimat i gidrologicheskie processy na Bajkale (1968–2007 gg.) [The zonal circulation of the atmosphere, climate and hydrological processes at the Lake Baikal (1968–2007)], *Geografija i prirodnye resursy*, 2010, no 3, pp. 62–68 (in Russian).

Thorslund J., Jarsjö J., Chalov S.R., Belozerovala E.V. Gold mining impact on riverine heavy metal transport in a sparsely monitored region: the upper Lake Baikal Basin case // *J. Environm. Monitoring*. 2012. Vol. 14. P. 2780–2792.

Wedepohl K.H. The composition of the continental crust // *Geochim. et Cosmochim. Acta*. 1995. Vol. 59. P. 1217–1232.

Received 16.03.2016

Accepted 16.03.2016

ГЕОХИМИЯ ПРИРОДНЫХ ЛАНДШАФТОВ

УДК 911.2(571, 517)

М.Д. Богданова¹, М.И. Герасимова², И.А. Горбунова³, Н.В. Рябова⁴, М.Ю. Лычагин⁵

ЛАНДШАФТНО-ГЕОХИМИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ БАССЕЙНА Р. СЕЛЕНГА

Для комплексной оценки условий формирования природных и техногенных потоков вещества в пределах бассейна Селенги и возможностей их поступления в речную сеть составлена ландшафтно-геохимическая карта в масштабе 1:1,5 млн. Учитывались общие принципы систематики геохимических ландшафтов: биологический круговорот, продукция биомов, классы водной миграции. Контрастность рельефа и увлажнения определяет условия миграции вещества: преимущественный вынос его из ландшафтов высокогорий; преобладание транзита в среднегорьях; существенная аккумуляция в межгорных котловинах, осложненная процессами транзита в речных долинах и дельтах. С этих позиций проведена целенаправленная интерпретация свойств основных компонентов ландшафта (рельеф, породы, мерзлота, климат, растительность, почвы) в связи с их ролью в геохимических процессах миграции и аккумуляции веществ. Биогеенная миграция представлена традиционным способом (зональность, БИК, продукция); в оценке водной миграции подчеркиваются ее климатические ограничения (продолжительность активного периода, мерзлотные условия). Для механической миграции разные возможности ее проявления оцениваются на уровне миграционных структур разного порядка.

Ключевые слова: ландшафтно-геохимическое картографирование, методология, показатели, природные факторы, условия миграции, виды миграции.

Введение. Ландшафтно-геохимическое картографирование стало развиваться с 1954 г., когда в журнале «Природа» была опубликована ландшафтно-геохимическая (ЛГХ) карта европейской территории СССР в масштабе 1:10 млн, составленная А.И. Перельманом. В 1964 г. в Физико-географический атлас мира [1964] включена ЛГХ карта А.И. Перельмана всей территории СССР в масштабе 1:20 млн. Обе карты базируются на разработанной А.И. Перельманом классификации геохимических ландшафтов [1961]. Эти две оригинальные карты были первым шагом в развитии нового направления в тематическом картографировании.

К настоящему времени накоплен опыт ЛГХ картографирования разного назначения. Основной массив базовых мелкомасштабных ЛГХ карт опубликован в комплексных атласах наряду с другими тематическими природными картами. Прикладное ЛГХ картографирование развивалось в течение многих лет в поисковой геохимии. В настоящее время наиболее актуально экологическое направление ЛГХ картографирования, ориентированное на оценку условий формирования природных и техногенных потоков вещества, прогноз загрязнения различными элементами и соединениями, оценку устойчивости ландшафтов (и рисков) в разных природных и техно-

ногенно модифицированных регионах, включая города.

А.И. Перельман стоял у истоков и другого направления тематического картографирования, очень близкого к ландшафтно-геохимическому, – почвенно-геохимического (ПГХ). Первая ПГХ карта «Геохимические условия миграции микроэлементов в почвах Среднего региона» в масштабе 1:2,5 млн составлена под его руководством, на ней показано пространственное размещение почвенно-геохимических обстановок, обуславливающих поведение химических элементов и соединений [1979]. Составление этой карты предполагало целенаправленную интерпретацию свойств почв с точки зрения условий миграции в почвенных профилях.

Для комплексной оценки условий формирования природных и техногенных потоков вещества в бассейне Селенги и возможностей их поступления в речную сеть составлена серия карт, отражающих разные аспекты природных условий, способствующих или ограничивающих формирование миграционных потоков. Главная карта в серии – ЛГХ; ее дополняют ПГХ, литогеохимическая и эколого-геохимическая карты.

Материалы и методы исследований. Анализ опубликованных мелкомасштабных ландшафтно-

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра геохимии ландшафтов и географии почв, ст. науч. с, канд. геогр. н.; e-mail: md-bogdanova@yandex.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра геохимии ландшафтов и географии почв, профессор, докт. биол. н.; e-mail: maria.i.gerasimova@gmail.com

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра геохимии ландшафтов и географии почв, доцент, канд. геогр. н.; e-mail: iagorb@mail.ru

⁴ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра географии мирового хозяйства, инженер; e-mail: rjabova99@mail.ru

⁵ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра геохимии ландшафтов и географии почв, доцент, канд. геогр. н.; e-mail: lychagin@geogr.msu.ru

геохимических карт показал, что в содержании, методологических подходах, выборе параметров имеются определенные различия, связанные с авторскими концепциями, спецификой картографируемой территории, задачами картографирования и исходными фактическими данными. Практически все ЛГХ карты содержат большой объем разнообразной информации. Как правило, общие элементы их содержания представлены зональными ландшафтами или группами формаций растительности с определенными характеристиками биологического круговорота, а также классами водной миграции. На картах по-разному интерпретируются литолого-геоморфологические условия, что зависит от особенностей территории картографирования и авторской концепции. Чаще всего приоритетны зональные подходы.

Представленная в статье ландшафтно-геохимическая карта бассейна Селенги масштаба 1:1,5 млн составлена в целях изучения особенностей ЛГХ дифференциации территории, оценки возможностей поступления загрязнителей в речную сеть; карта основана на анализе природных условий, способствующих формированию миграционных потоков или их ограничивающих.

Бассейн Селенги и ее крупных притоков расположен на территории России и Монголии, занимает Селенгинское среднегорье и окружающие его хребты (северный макросклон Хангайского хр., хребты Хентей, Джидинский и др.) и межгорные котловины. Характерно сочетание зональной и высотно-поясной структуры ландшафтов: горные тундры и криофитные луга, горная тайга, экспозиционная лесостепь, мезофильные и сухие степи. Изверженные породы часто сменяются метаморфическими, рыхлые отложения имеют небольшую мощность, мерзлотные процессы происходят в тундровом и горно-таежном поясах, эоловые – в степном и сухостепном. Территория картографирования хорошо изучена, есть ряд тематических карт, составленных в разное время и в разном масштабе.

Результаты исследований и их обсуждение.

Концептуальная основа карты предполагает учет контрастности рельефа и увлажнения, что определяет условия миграции вещества – преимущественный вынос его из ландшафтов высокогорий, преобладание транзита в среднегорьях, а также существенная аккумуляция в межгорных котловинах, которая осложнена процессами транзита в речных долинах и дельтах. Такой подход соответствует принципам выделения гидродинамических областей в бассейне Селенги по условиям формирования поверхностного и внутрипочвенного стока [Экосистемы..., 2005] и отражен в схеме ЛГХ районирования [Герасимова и др., 2014].

В геохимических ландшафтах на территории бассейна сформировались характерные условия выноса, транзита и концентрации химических элементов и соединений, реализующиеся в разных типах радиальной и латеральной миграции. Так, миграционные процессы в высокогорьях и среднегорьях бассейна Селенги определяются, с одной стороны,

климатическим потенциалом миграции, с другой – особенностями биологического круговорота и осуществляются в определенных геохимических обстановках в почвах.

Если в областях преимущественного выноса вещества господствует перемещение твердого вещества в виде обвальнo-осыпных явлений, линейной эрозии и солифлюкции с меньшим вкладом водной миграции (растворов), то в областях преимущественной аккумуляции и транзита вещества в процессы миграции–аккумуляции вовлечены в основном мелкозем и растворенные вещества. Соотношение миграционных процессов зависит от морфологии речных долин, характера аллювиальных и делювиально-пролювиальных отложений, в меньшей степени от растительности и ряда локальных явлений (эоловых, криогенных, влияния грунтовых вод). Особенности миграции в растворах во всех геохимических ландшафтах отражены в классах водной миграции.

Ландшафтно-геохимическая карта бассейна Селенги строго не связана с классификациями геохимических ландшафтов [Глазовская, 1989; Перельман, Касимов, 1999], но в ней используются их отдельные положения. Так, при разработке содержания карты учитывались общие принципы систематики геохимических ландшафтов: представления о биологическом круговороте, продукции биомов и классах водной миграции, адаптированные к специфическим особенностям природы бассейна. На карту вынесены наиболее значимые свойства геохимических ландшафтов как природного фона формирования и протекания разнообразных природных и техногенных миграционных процессов в ландшафтах. С этих позиций проведена целенаправленная интерпретация свойств основных компонентов ландшафта (рельеф, породы, мерзлота, климат, растительность, почвы) в связи с их ролью в геохимических процессах миграции и аккумуляции химических элементов и соединений.

Источниками для составления ландшафтно-геохимической карты бассейна Селенги послужили разнообразные литературные сведения о природных условиях территории и картографические материалы. Наиболее полезные для наших целей сведения содержатся в монографиях [Геоморфология..., 1982; Ногина, 1964; Почвенный..., 1984; Экосистемы..., 2005]; разнообразны использованные картографические материалы [Атлас..., 1967; Геологическая..., 1972; Государственная геологическая...; Государственная почвенная...; Карта использования..., 1981; Карта растительности..., 1979; Национальный..., 1990; Растительность юга..., 1972]. Для уточнения некоторых характеристик выделяемых ареалов и их границ мы обращались к космическим снимкам GoogleEarth.

Главный источник сведений – почвенно-геохимическая (ПГХ) карта бассейна Селенги, составленная нами в масштабе 1:1,5 млн [Богданова и др., 2015]. Традиционно при ЛГХ картографировании особое внимание уделялось свойствам почв и почвенному профилю – главному звену в миграцион-

Миграционно-аккумулятивные структуры	Растительность		Кустарники – береза, ива Участки тополевых лесов	Злаково-разнотравные луга
	Почвы		Аллювиальные слаборазвитые и дерновые (24, 25)	Аллювиальные перегноино-гумусовые и дерновые глееватые (25, 27)
	Рельеф	Классы влдной миграции	H ⁺	Ca ²⁺
		Отложения	H ⁺ – Fe ²⁺	
Транзитные	Узкие поймы горных рек с участками долин прорыва	Галечниково-валунно-щебнистые	1	2
	Поймы слабо-меандрирующих рек	Мелкоземисто-щебнисто-галечниковые	3	4

Фрагмент легенды ландшафтно-геохимической карты бассейна Селенги: *a* – основная легенда; *b* – легенда для дельтово-долинных ландшафтов

Fragment of the legend to the landscape-geochemical map of the Selenga River basin: *a* – main legend; *b* – legend for deltaic-valley landscapes

ных потоках. На ПГХ карте подробно отражены основные факторы миграции и аккумуляции веществ в почвах.

Содержание ландшафтно-геохимической карты представлено геохимическими ландшафтами с акцентом на условия и процессы выноса и аккумуляции вещества. Учитывая приоритет литолого-геоморфологических факторов для горной территории, в основу пространственной дифференциации геохимических ландшафтов положена составленная ранее карта ЛГХ районирования бассейна Селенги масштаба 1:2,5 млн [Герасимова и др., 2014].

По преобладанию главных процессов пространственной дифференциации вещества среди всего массива геохимических ландшафтов бассейна выделены дельтово-долинные ландшафты. Последние включают речные долины, внутренние дельты, дельту Селенги и озерные впадины; они названы «геохимическими ландшафтами с преобладанием процессов транзита и аккумуляции». Основной массив геохимических ландшафтов бассейна определяется как «геохимические ландшафты с преобладанием процессов выноса и транзита», это горные хребты, плато, склоны, подгорные равнины. Таким же образом выделены гидродинамические области, включающие «типы местоположений, где происходят разнокачественные процессы твердого стока» [Экосистемы..., 2005]. Рассмотрим особенности обеих групп геохимических ландшафтов.

Геохимические ландшафты с преобладанием процессов выноса и транзита. Картографирование ландшафтов этой группы оказалось сложным и потребовало учета многих взаимозависимых показателей, которые можно разделить на два блока:

1) биоклиматический потенциал миграции–аккумуляции вещества, обеспечивающий возможность и продолжительность протекания процессов выно-

са, трансформации, переноса и аккумуляции вещества в ландшафтах (достаточность увлажнения и термических ресурсов, вклад растительных сообществ, геохимические функции почв);

2) литолого-геохимические условия реализации этих процессов, т.е. миграционные структуры.

Биоклиматический потенциал миграции–аккумуляции вещества в ландшафтах определяется зональными условиями, которые охарактеризованы климатическими и биотическими показателями. Климатический компонент потенциала представлен следующими показателями: тип климата (очень холодный, холодный, умеренно холодный и умеренно теплый); длительность безморозного периода, в течение которого могут протекать миграционные процессы; характер увлажнения (повышенное, достаточное, недостаточное и скудное), что с позиций оценки процессов миграции очень важно, поскольку количество влаги в ландшафте определяет возможности водной миграции. Дополнительно приведены сведения о геокриологических условиях: сплошная, островная мерзлота и длительное сезонное промерзание. Резко континентальный климат и неблагоприятные геокриологические условия определяют краткость и заторможенность миграционных процессов в геохимических ландшафтах первой группы.

Интенсивность и емкость биологического круговорота веществ сильно варьируют в пределах бассейна. Большой набор высотных поясов (от низового до степных) в сочетании с экспозиционными эффектами определяет резкую дифференциацию условий биогенной миграции. Интенсивность биологического круговорота оценена от очень низкой в тундровом поясе до высокой в настоящих степях. В качестве показателя использована величина биопродукции. Для нее приводятся количественные

характеристики (т/га/год), полученные как прямыми измерениями, так и экстраполяцией данных о типичных растительных сообществах в соответствии с известными правилами [Базилевич и др., 1986].

Геохимические обстановки в ландшафтах характеризуются классами водной миграции. На территории бассейна преобладают кислые и кислые глеевые (H^+ , H^+-Fe^{2+}) классы в верхних горных поясах – тундровом и таежном, в степном поясе – Ca^{2+} и $Ca^{2+}-Na^+$.

Литолого-геоморфологические условия миграции во внедолинных геохимических ландшафтах определяются характером рельефа в сочетании со свойствами пород. По соотношению общих процессов перемещения вещества выделено три типа макроструктур: денудационные, аккумулятивно-денудационные и денудационно-аккумулятивные, объединяющие 9 типов рельефа. В пределах каждого типа возможности формирования миграционных потоков различаются на региональном и локальном уровнях.

На локальном уровне традиционно различаются тренды миграционных потоков по соотношению вертикально направленного радиального (R) потока, осуществляющего обмен веществом (преимущественно в форме водной миграции) между ярусами элементарного ландшафта, и латерального (L) – склонового и внутрипочвенного потока в сопряженных системах автономный ландшафт – подчиненный ландшафт [Касимов и др., 2012], который в бассейне Селенги реализуется в форме не только водной, но и гравитационной миграции. Так, для высоких и средних сильнорасчлененных гор $R \ll L$, для умеренно расчлененного плато $R < L$, для средневысотных гор и плоскогорий $R \approx L$, на высоких равнинах с отдельными останцами эта характеристика имеет вид $r > l$, что отражает слабую интенсивность с преобладанием радиальной миграции. Локальные миграционные потоки зависят от увлажнения и дифференцированы по вертикальным поясам (таежные, лесостепные, степные).

На региональном уровне отдельных горных массивов, плато, мелкосопочника экспертным путем оценивается потенциальная интенсивность миграции от высокой (в горах) до низкой (в степных высоких равнинах и межгорных котловинах). Наряду с водной предполагаются и разные формы механической миграции – обвально-осыпной, делювиальной, пролювиальной, эоловой. Ландшафтно-геохимическая контрастность оценивается по сложности макрокатаен, т.е. участия в последних более или менее широкого спектра катен разных высотных поясов – степных, таежных, экспозиционно-лесостепных, гольцовых. Высокая контрастность характерна для высоких и средних гор с большим диапазоном вертикальной поясности от гольцов до сухих степей. Низкая контрастность присуща равнинным степным территориям.

Характерная природная особенность бассейна – значительная пестрота магматических и метаморфических пород (преимущественно кислого и основного состава), чередующихся с вулканогенными и терригенными образованиями, что обуславливает

чрезвычайно разнообразный литогеохимический фон и господство гетеролитных ЛГХ структур на всех уровнях. Сложность и разнообразие массивов горных пород, осложненных разломной тектоникой, отражены на карте сочетанием преобладающих и дополнительных (сопутствующих) плотных пород, главным образом изверженных и метаморфических, а также осадочных. На территории бассейна выявлено 26 вариантов сочетания пород.

Геохимические ландшафты с преобладанием процессов транзита и аккумуляции. Миграционные структуры речных долин, внутренних дельт и замкнутых озерных котловин ранжированы по соотношению процессов транзита и аккумуляции вещества, которые зависят от интенсивности водообмена и транспортирующей способности реки. Соотношение определяется экспертным путем по морфологии долины, особенностям меандрирования основного русла и проток, обилию русел и стариц, их проточности, перепаду высот на участках долины, засолению или заболоченности, составу отложений. В соответствии с перечисленными критериями выделены геохимические ландшафты долин, дельт и озерных котловин, которые были сгруппированы следующим образом:

- транзитные (узкие поймы горных рек с участками долин прорыва и поймы слабомеандрирующих рек с галечниково-валунным аллювием);
- транзитно-аккумулятивные (поймы умеренно меандрирующих рек, внутренние дельты и дельта Селенги);
- преимущественно аккумулятивные (поймы сильномеандрирующих рек с мелкоземистым аллювием);
- аккумулятивные (бессточные и слабодренированные депрессии и котловины) ландшафты.

Всего выделено 17 типов геохимических ландшафтов с преобладанием процессов транзита и аккумуляции. Контуры дельтово-озерно-речных ландшафтов выделены путем дешифрирования космических снимков (GoogleEarth).

Детальность представления на карте геохимических ландшафтов дополнена общей картиной распределения видов *миграционных процессов*. Бассейн Селенги отличается контрастными условиями миграции с преобладанием механической (гравитационные и эоловые процессы) и водной. На севере (в бурятской части бассейна) и в хр. Хангай и Хентей при достаточном количестве осадков преобладает водная миграция, в горах она сочетается с механической. На значительной части территории, особенно в южных районах, при малом количестве осадков господствуют процессы механической миграции: в горах – обвально-осыпные, делювиальные, солифлюкционные; в мелкосопочнике и среднегорьях широко распространены эоловые процессы.

Легенда карты. Содержание карты синтезировано в двух матричных легендах, соответствующих разделению геохимических ландшафтов на внедолинных и дельтово-озерно-речных, матричная форма легенд считается оптимальной для таких сложных карт (рисунок).

Многоуровневая матричная легенда внедолинных ландшафтов представляет миграционные структуры и биоклиматический потенциал геохимических ландшафтов: в столбцах содержатся климатические и биотические показатели; в строках – характеристики условий миграции, связанные с рельефом и породами. Комбинациями показателей в ячейках легенды представлены геохимические ландшафты с определенным набором миграционных структур, биоклиматическим миграционным потенциалом и классами водной миграции.

Вторая матрица отражает обстановки миграции в речных долинах, дельтах и озерных котловинах, она значительно проще в силу меньшего разнообразия и сложности строения картографируемых объектов.

В обеих матрицах приводятся названия господствующих растительных сообществ и почв, как это делается на многих ЛГХ картах. Свойства почв учитываются двумя способами. С одной стороны, генетические названия почв в легенде можно считать «кодом», прочтение которого дает характеристику свойств почв, важных для оценки процессов геохимических миграций. С другой стороны, к генетическим названиям почв добавлены номера, соответствующие единицам легенды почвенно-геохимической карты, где раскрыты наиболее важные геохимические свойства почв (кислотно-основные, окислительно-восстановительные, водный режим, наличие горизонтов – геохимических барьеров). Таким способом представлена более полная информация о комплексе условий геохимической миграции в ландшафтах и почвах.

Основное содержание карты передается цветом. Подбор цветовой гаммы определяется разделением ландшафтов на макроструктуры и иллюстрирует интенсивность процессов денудации – транзита – аккумуляции. Штриховкой показаны миграционные процессы.

Особое значение для изучения трансграничного переноса в оз. Байкал и условий миграции веществ в ландшафтах и их компонентах имеет анализ фак-

торов миграции в речных водах. Для отражения этих условий к ЛГХ карте добавлена *карта-врезка* в масштабе 1:5 млн «Условия миграции в речных водах». Обстановка миграции химических элементов и соединений в речных водах во многом зависит от кислотно-основных условий (интервалов значений pH), влияющих на растворимость соединений и их подвижность. Минерализация вод и количество речных взвесей характеризуют реальную миграцию веществ по речным системам – в виде растворов (минерализация, мг/л) и во взвешенном состоянии (содержание взвесей, мг/л). Источниками составления карты послужили полевые материалы экспедиции «Селенга–Байкал», проводившей исследования рек бассейна Селенги в 2011–2015 гг. Основной массив данных относится к межennale периоду и характеризует наиболее типичное состояние речных вод. Содержание карты основано на обобщенных данных по трем характеристикам.

Выводы:

– ландшафтно-геохимическая карта бассейна Селенги содержит как традиционные черты карт этого направления тематического картографирования, так и новые, связанные со спецификой территории. К традиционным можно отнести использование большого числа параметров, поэтому карта снабжена сложной легендой в матричной форме;

– концептуально карта основана на «классических» представлениях о видах миграции – механической, биогенной, водной. Биогенная миграция представлена традиционным способом (зональность, БИК, продукция), для водной миграции приведены ее климатические ограничения (продолжительность активного периода, геофизиологические условия). Возможности проявления механической миграции оцениваются на уровне миграционных структур разного порядка для нескольких вариантов (обвально-осыпные, делювиальные, эоловые и другие процессы). Отношение к механической миграции в значительной степени определяется комплексом природных условий территории.

Благодарности. Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-27-00083). Авторы благодарны сотрудникам Российско-Монгольской экспедиции С.Н. Баже, П.Д. Гунину, С.Ф. Концову, а также И.С. Михайлову за консультации по полевым исследованиям и предоставленные картографические материалы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Атлас Забайкалья (Бурятская АССР и Читинская область). М.: Иркутск: ГУГК, 1967.
- Базилевич Н.И., Гребенников О.С., Тишков А.А. Географические закономерности структуры и функционирования экосистем. М.: Наука, 1986. 298 с.
- Богданова М.Д., Герасимова М.И., Горбунова И.А. и др. Почвенно-геохимическая карта бассейна Селенги // Экосистемы Центральной Азии в современных условиях социально-экономического развития: Мат-лы междунар. конференции, Бэмби Сан Улан-Батор, Монголия. 2015. Т. 1. С. 392–396.
- Геологическая карта Монгольской Народной Республики, масштаб 1:1,5 млн / Гл. ред. Н.А. Маринов. М.: ГУГК, 1972.
- Геоморфология Монгольской Народной Республики. М.: Наука, 1982. 364 с.
- Герасимова М.И., Касимов Н.С., Горбунова И.А. и др. Ландшафтно-геохимическое районирование бассейна Селенги // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2014. № 6. С. 66–72.
- Глазовская М.А. Геохимические ландшафты мира: концепция и принципы картографирования // Изв. АН СССР. Сер. геогр. 1989. № 5. С. 25–33.
- Государственная геологическая карта Российской Федерации, масштаб 1:1 млн, листы М-48, М-49, N-48, N-49. М.: Роснедра, 2009–2012.

Государственная почвенная карта СССР, масштаб 1:1млн, листы М-48, М-49, N-48, N-49. М.: ГУГК, 1963–1980.

Карта использования почв Монголии, масштаб 1:1 млн / Под ред. И.С. Михайлова, Д. Доржготова. Листы L-47, L-48, M-47, M-48. Советско-Монгольская комплексная экспедиция АН СССР, 1981.

Карта растительности Монгольской Народной Республики, масштаб 1:1,5 млн / Под ред. Е.М. Лавренко. М.: ГУГК, 1979.

Касимов Н.С., Гаврилова И.П., Герасимова М.И., Богданова М.Д. Ландшафтно-геохимическая карта России в Национальном атласе // Геохимия ландшафтов и география почв. К 100-летию М.А. Глазовской. М.: АПР, 2012. С. 45–58.

Национальный атлас Монгольской Народной республики. Улан-Батор; Москва: ГУГК, 1990.

Ногина Н.А. Почвы Забайкалья. М.: Наука, 1964. 314 с.

Перельман А.И. Геохимия ландшафта. М.: Гос. изд-во геогр. лит-ры, 1961. 496 с.

Перельман А.И., Касимов Н.С. Геохимия ландшафта. М.: Астрель, 1999. 764 с.

Почвенный покров и почвы Монголии. М.: Наука, 1984. 191 с.

Растительность юга Восточной Сибири, масштаб 1:1,5 млн / Под ред. В.Б. Сочавы. М.: ГУГК, 1972.

Физико-географический Атлас мира. М.: ГУГК, 1964.

Экосистемы бассейна Селенги. М.: Наука, 2005. 359 с.

Поступила в редакцию 15.02.2016

Принята к публикации 16.03.2016

**M.D. Bogdanova¹, M.I. Gerasimova², I.A. Gorbunova³,
N.V. Ryabova⁴, M.Yu. Lychagin⁵**

LANDSCAPE-GEOCHEMICAL STUDIES IN THE SELENGA RIVER BASIN

The landscape-geochemical map, scale 1:1,5M, was compiled to facilitate the integrated assessment of natural and technogenic fluxes of matter within the catchment area of the Selenga River with its main tributaries, and to forecast the possibility to be discharged into these rivers. The following major approaches to characterize the geochemical landscapes were applied: biological cycling, production of biomes, water migration classes. Contrasts in relief and moisture patterns differentiate conditions of substances and chemical elements translocation: removal from landscapes of highlands, predominance of transit in midlands, prevailing accumulation in intermontane depressions and in river valleys and deltas, where accumulation is associated with transit phenomena. Bearing this in mind, a purposeful interpretation was performed for the main landscape components (relief, rocks and sediments, climate, permafrost, vegetation, soils) revealing their contributions to geochemical migrations. The biogenic migration is represented in a traditional way (zones, biological cycling, production); for water migration the emphasis is put on its climatic restrictions (duration of active period, freezing and permafrost). Diverse manifestations of mechanical migration are implemented in migrational structures of different hierarchical levels.

Keywords: landscape-geochemical mapping, methodology, parameters, natural factors, conditions for geochemical migrations, types of migration.

Acknowledgements. The study was financially supported by the Russian Science Foundation (project N 14-27-00083). The authors express their gratitude to S.N. Bazha, P.D. Gunin, S.F. Kontsov, members of the Russian-Mongolian Expedition, as well as to I.S. Mikhailov for consulting on field research and providing with maps.

REFERENCES

Atlas Zabajkal'ja (Burjatskaja ASSR i Chitinskaja oblast') [Atlas of Trans-Baikal Area (Buriat Republic and Chita oblast)], Moscow; Irkutsk, GUGK, 1967 (in Russian).

Bazilevich N.I., Grebenshnikov O.S., Tishkov A.A. Geograficheskie zakonomernosti struktury i funkcionirovaniya ekosistem [Geographical regularities of structure and functioning of ecosystems], Moscow, Nauka, 1986, 298 p. (in Russian).

Bogdanova M.D., Gerasimova M.I., Gorbunova I.A. et al. Pochvenno-geohimicheskaja karta bassejna Selengi [Soil-geochemical

map of the Selenga River basin], «Ekosistemy Central'noj Azii v sovremennyh uslovijah social'no-jekonomicheskogo razvitiya», Matly Mezhd. konf., Bjembi San Ulan-Bator, Mongolija, 2015, vol. 1, pp. 392–396 (in Russian).

Fiziko-geograficheskij Atlas mira [Physico-geographical World Atlas], Moscow, GUGK, 1964 (in Russian).

Geologicheskaja karta Mongol'skoj Narodnoj Respubliki [Geological map of Mongolian People Republic], scale 1:1,5 M. Editor-in-Chief N.A. Marinov, Moscow, GUGK, 1972 (in Russian).

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Landscape Geochemistry and Soil Geography, Senior Research Scientist, PhD in Geography; *e-mail*: md-bogdanova@yandex.ru

² Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Landscape Geochemistry and Soil Geography, Professor, D.Sc. in Biology; *e-mail*: maria.i.gerasimova@gmail.com

³ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Landscape Geochemistry and Soil Geography, Associate Professor, PhD in Geography; *e-mail*: iagorb@mail.ru

⁴ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Geography of World Economy, Engineer; *e-mail*: rjabova@mail.ru

⁵ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Landscape Geochemistry and Soil Geography, Associate Professor, PhD in Geography; *e-mail*: lychagin@geogr.msu.ru

Geomorfologija Mongol'skoj Narodnoj Respubliki [Geomorphology of Mongolian People Republic], Moscow, Nauka, 1982, 364 p. (in Russian).

Gerasimova M.I., Kasimov N.S., Gorbunova I.A. et al. Landshaftno-geohimicheskoe rajonirovanie bassejna Selengi [Landscape-geochemical zoning of the Selenga River basin], Vestnik Mosk. un-ta, ser. geogr., 2014, no 6, pp. 66–72 (in Russian).

Glazovskaja M.A. Geohimicheskie landshafty mira: koncepcija i principy kartografirovanija [Geochemical landscapes of the World: concepts and principles of mapping], Izv. AN SSSR, ser. Geograficheskaja, 1989, no 5, pp. 25–33 (in Russian).

Gosudarstvennaja geologicheskaja karta Rossijskoj Federacii [State Geological map of the Russian Federation], scale 1:1 M, listy M-48, M-49, N-48, N-49. Moscow, Rosnedra, 2009–2012 (in Russian).

Gosudarstvennaja pochvennaja karta SSSR [State Soil Map of the USSR], scale 1:1 M, listy M-48, M-49, N-48, N-49. Moscow, GUGK, 1963–1980 (in Russian).

Jekosistemy bassejna Selengi [Ecosystems of the Selenga River basin], Moscow, Nauka, 2005, 359 p. (in Russian).

Karta ispol'zovanija pochv Mongolii [Map of land use of Mongolian soils], scale 1:1M. Editors: I.S. Mihajlov, D. Dorzhgotov. Sheets: L-47, L-48, M-47, M-48. Sovetsko-Mongol'skaja kompleksnaja jekspedicija AN SSSR, 1981 (in Russian).

Karta rastitel'nosti Mongol'skoj Narodnoj Respubliki [Vegetation map of Mongolian People Republic], scale 1:1,5 M. Ed. by E.M. Lavrenko, Moscow, GUGK, 1979 (in Russian).

Kasimov N.S., Gavrilova I.P., Gerasimova M.I., Bogdanova M.D. Landshaftno-geohimicheskaja karta Rossii v Nacional'nom atlase [Landscape-geochemical map in the national Atlas of Russia], Geohimija landshaftov i geografija pochv. K 100-letiju Marii Al'fredovny Glazovskoj, Moscow, APR, 2012, pp. 45–58 (in Russian).

Nacional'nyj atlas Mongol'skoj Narodnoj respubliki [National Atlas of Mongolian People Republic], Ulan-Baatar–Moscow, GUGK, 1990 (in Russian).

Nogina N.A. Pochvy Zabajkal'ja [Soils of Trans-Baikal area], Moscow, Nauka, 1964, 314 p. (in Russian).

Perel'man A.I. Geohimija landshafta [Geochemistry of landscape], Moscow, Izd. Geograf. lit-ry, 1961, 496 p. (in Russian).

Perel'man A.I., Kasimov N.S. Geohimija landshafta [Geochemistry of landscape], Moscow, Astreja, 1999, 764 p. (in Russian).

Pochvennyj pokrov i pochvy Mongolii [Soil cover and soils of Mongolia], Moscow, Nauka, 1984, 191 p. (in Russian).

Rastitel'nost' juga Vostochnoj Sibiri [Vegetation of the south of Eastern Siberia], scale 1:1,5 M. Ed. by V.B. Sochava, Moscow, GUGK, 1972 (in Russian).

Received 15.02.2016

Accepted 16.03.2016

УДК 504.53.0.54/064+547.62

А.Н. Геннадиев¹, Ю.И. Пиковский², М.А. Смирнова³, А.П. Жидкин⁴, Р.Г. Ковач⁵

УГЛЕВОДОРОДНОЕ СОСТОЯНИЕ ПОЧВ ФОНОВЫХ ТАЕЖНЫХ ЛАНДШАФТОВ (ЮГО-ЗАПАДНАЯ ЧАСТЬ УСТЬЯНСКОГО ПЛАТО)

Изучены природные модификации углеводородного состояния (УВС) среднетаежных почв, формирующихся при их разном гранулометрическом составе, под различной растительностью и в разных условиях аэрации, в том числе в условиях спонтанной свободной циркуляции газа, обогащенного углеводородами. Проведено сравнение состава и содержания основных компонентов УВС исследованных среднетаежных почв и опубликованных ранее данных УВС южнотаежных почв. Сделан вывод о том, что характер локального увлажнения играет более важную роль в формировании УВС почв, чем подзональные биоклиматические различия. Показано, что преобладающий тип УВС природных почв – биогеохимический. В некоторых почвах можно выделить наложенный эманационный тип, отличающийся от биогеохимического главным образом газовой составляющей УВС почв.

Ключевые слова: битуминозные вещества, полициклические ароматические углеводороды, почвенный воздух, факторы почвообразования, подзолы, подзолистые почвы.

Введение. В настоящее время отмечается повышенное внимание к изучению поведения различных углеводородных соединений в ландшафтах, особенно в почвах. Это обусловлено тем, что обширные фрагменты почвенного покрова находятся под воздействием добычи, транспортировки и переработки нефти и газа. Однако, несмотря на большой объем таких работ, остается ряд вопросов, которые требуют ответа.

Во-первых, подавляющее большинство публикаций посвящено поведению в почвенном покрове именно техногенных углеводородов (УВ) [Геннадиев и др., 2015б]. Между тем углеводородные соединения необходимо изучать и в почвах естественных ландшафтов, не измененных техногенными факторами. Известно, что природные процессы играют важную роль в обогащении почв углеводородами (УВ). А.И. Перельман [1979] даже выделял особую *углеводородную функцию живого вещества*, которая реализуется в бескислородной среде при разложении органических остатков микроорганизмами. Он также подчеркивал, что другим источником УВ в почвах могут быть «углеводороды, возникающие на глубинах в сотни и тысячи метров», которые «легко мигрируют... к земной поверхности» [там же, с. 205].

Во-вторых, практически не изучается широкий спектр углеводородов (УВ). Разные группы этих соединений и содержащих их веществ (нефть, нефтепродукты, полициклические ароматические углеводороды, алканы, УВ газы и др.) исследуются, как правило, раздельно и разными коллективами специалистов [Cayet, Lichtfouse, 2001; Agarwal et al., 2009;

Bayer et al., 2012], что не всегда позволяет установить генезис углеводородов в почве и всесторонне оценить такие характеристики, как устойчивость почв к воздействию УВ поллютантов, почвенный потенциал самоочищения от последних и др.

В работе использовано введенное авторами ранее комплексное понятие «углеводородное состояние почв» (УВС почв) [Пиковский и др., 2008, 2009], которое характеризуется набором следующих параметров: а) суммарное содержание и качественный состав битумоидов (веществ, экстрагируемых из почв неполярными и малополярными органическими растворителями); б) состав и уровни содержания индивидуальных углеводородных соединений, присутствующих в битумоиде (полициклических ароматических углеводородов); в) количество и индивидуальный состав свободных и удерживаемых почвой (адсорбированных и заземленных) УВ газов. При доминировании тех или иных факторов (импактное загрязнение почв продуктами техногенеза, выпадение поллютантов из атмосферы, дегазация глубоких слоев литосферы, биогеохимические процессы образования и окисления УВ внутри почвенной толщи и др.) формируются различные модификации УВС почв (инъекционный, атмо-седиментационный, эманационный, биогеохимический).

Кроме того, с учетом сказанного выше, здесь акцент сделан на изучение углеводородного комплекса фоновых почв. Ранее характеристики УВС почв, находящихся вне прямого техногенного воздействия, были получены для южнотаежных ланд-

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра геохимии ландшафтов и географии почв, профессор, докт. геогр. н.; e-mail: alexagenna@mail.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра геохимии ландшафтов и географии почв, вед. науч. с., докт. геогр. н.; e-mail: lumngu@mail.ru

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра геохимии ландшафтов и географии почв, науч. с., канд. геогр. н.; e-mail: summerija@yandex.ru

⁴ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра геохимии ландшафтов и географии почв, науч. с., канд. геогр. н.; e-mail: gidkin@mail.ru

⁵ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра геохимии ландшафтов и географии почв, науч. с.; e-mail: rkovach@yandex.ru

шафтов на участках Сатинского полигона МГУ имени М.В. Ломоносова (Калужская область) и в бассейне р. Ирень (Пермский край) [Краснопеева, 2008; Краснопеева, Пузанова, 2011]. Территории средней и северной тайги, к которым приурочены наиболее крупные нефтяные промыслы и тысячекилометровые нефте- и газопроводы, подобными исследованиями не затрагивались. Поэтому задача установления фонового УВС почв этих ландшафтов представляется особенно актуальной.

Таким образом, цель работы – установление природных модификаций УВС среднетаежных почв, которые находятся вне очевидного техногенного воздействия и отличаются разнообразием природных факторов почвообразования, включая наличие спонтанной свободной циркуляции газа, обогащенного углеводородами. В задачи исследования входило: а) выявление характеристик битуминозных веществ и углеводородных газов в почвенном покрове; б) оценка роли растительности, гранулометрического состава и степени гидроморфности почв в формировании модификаций УВС почв; в) сопоставление полученных данных о УВС фоновых среднетаежных почв с фоновыми параметрами УВС южнотаежных почв, исследованных ранее.

Материалы и методы исследований. Основные работы проведены в 2015 г. в пределах участка «Кокшеньга», расположенного на границе Архангельской и Вологодской областей. Рекогносцировочные исследования на этой территории выполнены в 2014 г., а первые результаты представлены в публикации [Геннадиева и др., 2015а]. Ключевой участок «Кокшеньга» расположен в пределах малозатронутой в настоящее время хозяйственной деятельностью юго-западной части Устьянского плато, в долине р. Кокшеньга и на междуречье рек Кокшеньга и Устья. В радиусе нескольких десятков километров от территории исследования отсутствуют какие-либо крупные предприятия, характеризующиеся интенсивными выбросами УВ.

Почвообразующие породы в пределах исследованной территории разнообразны. На водораздельных участках залегают флювиогляциальные и озерные пески, моренные суглинки, двучленные наносы с разной степенью радиальной контрастности по гранулометрическому и минералогическому составу и с разной мощностью верхнего субстрата [Гаврилова, Горбунова, 2002]. Террасы покрыты разновозрастными аллювиальными отложениями песчаного (от мелко- до крупнозернистого) гранулометрического состава с прослоями гравия и мелкой гальки. На водораздельных участках почвы формируются под ельниками черничными зеленомошными с преобладанием ели европейской, с участием ели сибирской. На тяжелых по гранулометрическому составу породах широко развиты заболоченные ландшафты. В пределах речных долин почвы формируются под сосняками бруснично-зеленомошными и багульниковыми зеленомошными на террасах и под луговой растительностью с таволгой вязолистной и осокой волосистой на поймах. Встречаются вторичные ело-

во-сосновые леса с примесью мелколиственных пород – березы повислой, березы пушистой и осины обыкновенной. Моховой покров хорошо развит, преобладают виды зеленых мхов и кукушкин лен. При ухудшении условий дренажа в локальных микропонижениях и западинах формируются зеленомошные растительные ассоциации. Почвенный покров на ключевом участке «Кокшеньга» представлен аллювиальными гумусовыми глеевыми и аллювиальными торфяно-глеевыми почвами в поймах рек, различными подтипами подзолов на террасах, подзолов и подзолистых почв (в том числе торфяных) на водораздельных участках. К особенностям территории относится наличие погребенных торфяных горизонтов, диагностируемых в обнажениях речных пойм.

Таким образом, к факторам, влияющим на характер УВС почв на исследованном участке, можно отнести резкую и часто контрастную смену почвообразующих пород, как в радиальном, так и в латеральном направлении, разные типы растительности и условий увлажненности почв, а также присутствие погребенных торфов.

В ходе полевых работ на территории выбранного ключевого участка проанализировано содержание углеводородов в свободно циркулирующем почвенном воздухе с помощью полевого газоанализатора «Drager». Исследования выполнены в 25 точках на площади около 30 км². На основании полученных данных и с учетом ландшафтно-геохимических условий и комбинаций факторов, влияющих на формирование УВС почв, заложено четыре почвенных разреза. Два разреза расположены на террасе р. Кокшеньга (разрезы 1, 2), сложенной древнеаллювиальными песками, и два – на водораздельной поверхности – на флювиогляциальных песках (разрез 3) и на двучленных отложениях (разрез 4). Кроме того, в зачистке на обрывистом берегу высокой поймы реки исследован погребенный торфяной горизонт. Образцы для исследования УВС почв отобраны из генетических горизонтов и подстилающей почвообразующей породы, а также из погребенного торфяного горизонта в обнажении и отложений, залегающих над и под торфяным горизонтом. Для анализа удерживаемых почвой газов (защемленных, адсорбированных, растворенных) образцы отбирались в герметизированные контейнеры.

Все химико-аналитические исследования образцов почв выполнены в лаборатории углеродистых веществ биосферы кафедры геохимии ландшафтов и географии почв географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

Анализ углеводородов (C₁–C₄) в почвенных газах проводился методом газовой хроматографии на приборе «Кристалл 5000.1» с пламенно-ионизационным детектором («Хроматэк») по стандартной методике [Методика..., 2005].

Для определения содержания C_{орг} применялся метод бихроматного окисления – мокрого озонения по Тюрину [Аринушкина, 1970], с использованием двухлучевого спектрофотометра «Specord M40».

Количественные и качественные характеристики битуминозных веществ изучали модифицированным методом люминесцентно-битуминологического анализа по В.Н. Флоровской [Краснопеева, 2007]. Битуминозные вещества экстрагировали из воздушно-сухих навесок почв *n*-гексаном при комнатной температуре. Выход флуоресценции полученного экстракта (гексанового битумоида) измеряли на приборе серии «Флюорат-2М» («Люмэкс») со сменными светофильтрами в ультрафиолетовой и видимой областях спектра. Стандарт для расчета количественных данных подбирался по соотношению люминесцентных характеристик раствора из базы данных. Качественную характеристику битумоида определяли по цвету и ширине капиллярной вытяжки, а также по соотношению выхода люминесценции в ультрафиолетовой и видимой областях спектра.

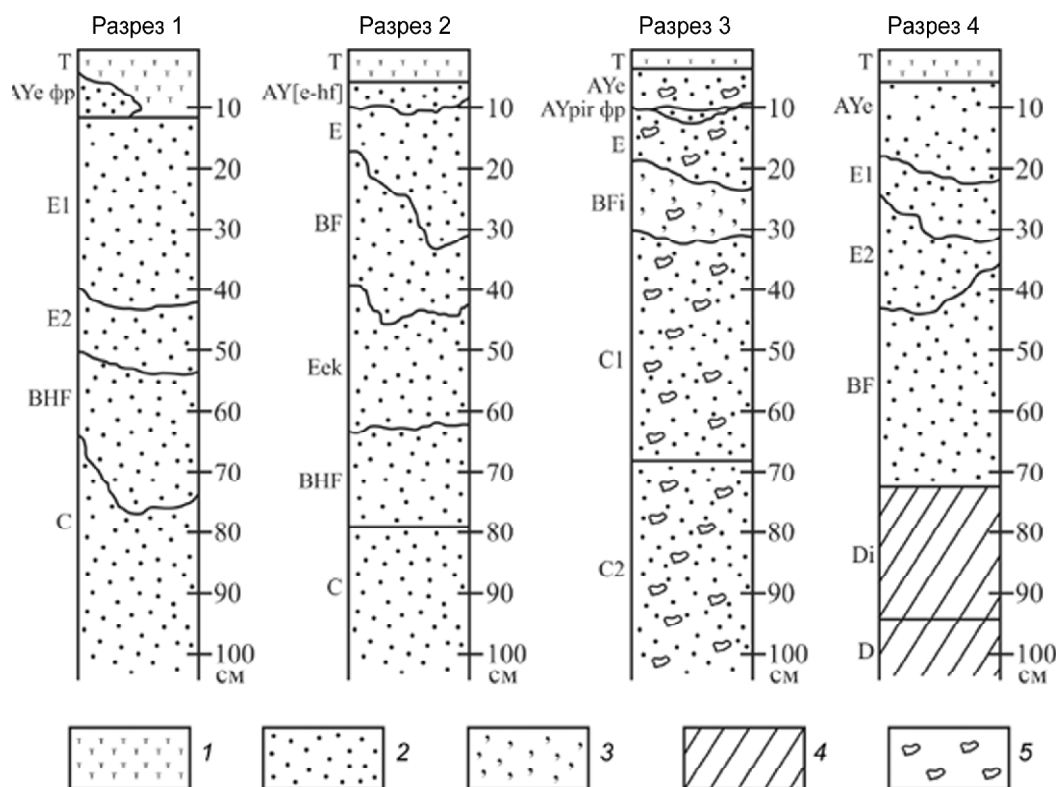
В гексановом битумоиде определяли 11 индивидуальных соединений полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) методом спектроскопии Шпольского – спектрофлуориметрический анализ при низкой температуре [Алексеева, Теплицкая, 1981; Теплицкая и др., 1981]. Измерения проведены на спектрофлуориметрическом комплексе «Флюорат-Панорама» («Люмэкс»), дополненного монохроматором «ЛМ-3» и криогенной приставкой «КРИО-1». В качестве стандарта для идентификации и количественного определения ПАУ использовали сертифицированный стандарт 2260a Национального института стандартов и технологий (США).

Результаты исследований и их обсуждение. Особенность исследованного ключевого участка

заключается в повышенной (до 16,5 ppm) концентрации суммы углеводородов в свободном почвенном воздухе в почвах.

Повышенная концентрация углеводородов в почвенном воздухе впервые обнаружена в почвах террасы р. Кокшеньга в ходе рекогносцировочных исследований в начале июля 2014 г. [Геннадиев и др., 2015a] и повторно подтверждена в конце июля 2014 г., а также весной и летом 2015 г. В ходе исследований, проведенных весной 2015 г., также выявлена высокая пространственная вариабельность концентрации суммарных УВ газов в свободном почвенном воздухе песчаных почв. На расстоянии ~2 м разница их содержания в торфяно-подзоле иллювиально-железисто-гумусовом и дерново-подзоле иллювиально-железисто-гумусовом достигала 13 ppm. Результаты морфологического исследования почв не позволяют высказать предположение о природе таких различий. Высокая пространственная вариабельность содержания углеводородов в почвах может быть обусловлена литологической неоднородностью подпочвенных отложений. При этом повышенная концентрация углеводородных газов в свободном воздухе наблюдается только в почвах, имеющих песчаный гранулометрический состав в пределах всего профиля. В болотных почвах и в почвах, формирующихся на двучленных отложениях, эти значения не превышали 3 ppm.

В ходе исследований получены данные о морфологическом строении почв на ключевом участке (рисунок). Разрезы 1 и 2 заложены на древнеаллювиальных песках высокой террасы р. Кокшеньга под сосняками бруснично-зеленомошными в местах с



Строение почвенных профилей и особенности почвообразующих пород: 1 – торф, 2 – песок, 3 – супесь, 4 – суглинок, 5 – щебень

The soil profiles and characteristics of parent sediment: 1 – peat, 2 – sand, 3 – sandy loam, 4 – loam, 5 – rock debris

повышенным (разрез 1) и низким (разрез 2) содержанием углеводов в почвенном воздухе. Почвы представлены торфяно-подзолами иллювиально-железисто-гумусовыми (разрез 1) и дерново-подзолами иллювиально-железисто-гумусовыми (разрез 2). Особенность торфяно-подзола иллювиально-железисто-гумусового – залегание торфяного горизонта (мощность от 3 до 11 см) непосредственно на элювиальном горизонте Е (мощность от 30 до 50 см); серогумусовый оподзоленный горизонт встречается фрагментарно. В пределах элювиального горизонта можно выделить два субгоризонта Е1 и Е2, отличающихся главным образом цветом, однородностью окраски и степенью увлажненности. Вышележащий субгоризонт Е1 характеризуется меньшей увлажненностью и более пестрой окраской вследствие образования в лишенных влаги почвенных порах желтовато-бурых железистых стяжений (диаметр до 1 мм) и железомарганцевых конкреций. Стяжения и конкреции обнаружены и в нижележащем субгоризонте Е2, однако в меньшем количестве. Залегающий ниже иллювиально-железисто-гумусовый горизонт ВНН характеризуется плотным сложением и коричнево-бурым цветом, в горизонте обнаружены непрочные темно-бурые конкреции (диаметр до 5 мм). На глубине 70–74 см залегает граница между горизонтом ВНН и бурой с желтоватым оттенком уплотненной почвообразующей породой.

Дерново-подзол иллювиально-железистый (разрез 2), в отличие от описанного выше торфяно-подзола иллювиально-железистого (разрез 1), характеризуется более сложным строением почвенного профиля. Под торфяным горизонтом (мощность от 5 до 8 см) залегает серогумусовый горизонт АУ[e-hf] с микропрофилем подзола (мощность горизонта от 4 до 14 см). В целом материал горизонта имеет серый оттенок; в верхней части выделяется тонкий микрогоризонт е с белесой присыпкой, сменяющийся микрогоризонтом hf, серым с буровато-желтым оттенком. Под серогумусовым горизонтом последовательно залегают элювиальный, иллювиально-железистый, элювиальный и иллювиально-железисто-гумусовый горизонты. Природа элювиального горизонта, обнаруженного между горизонтами ВНН и ВНН, по нашему мнению, обусловлена периодическим застоём влаги на поверхности более плотного горизонта ВНН и растворением железистых пленок с поверхности минеральных частиц материала вышележащего горизонта. Мощность элювиального контактно-осветленного горизонта варьирует от 6 до 30 см. На глубине ~80 см залегает верхняя граница почвообразующей породы.

На высокой пойме р. Кокшеньга в 170 м на северо-запад от разрезов 1 и 2 сделана зачистка, в которой на глубине ~5 м обнаружен торфяной пласт, залегающий на глинистых отложениях и погребенный песчаной толщей. Мощность торфа составляет ~50 см. Горизонт представлен неоднородным по цвету (встречаются прослои и линзы буровато-коричневого и серовато-бурого цвета) органическим

материалом разной степени разложения (от слабой до средней). В пределах высокой поймы горизонт встречается фрагментарно и может залегать на разной глубине.

Разрезы 3 и 4 заложены на водораздельной поверхности – щебнистых флювиогляциальных песках под березово-елово-сосновым бруснично-зелено-мошным лесом (разрез 3) и двучленных отложениях под елово-березовым лесом (разрез 4). Почва разреза 3 представлена дерново-подзолом иллювиально-железистым постпирогенным. Главные особенности почвы – большое количество обугленных остатков растений в верхней части профиля и (предположительно) литологическая неоднородность почвообразующей породы. Почва щебнистая, на глубине 17–30 см выделяется супесчаный иллювиально-железистый горизонт, граничащий сверху и снизу с песчаным материалом горизонтов Е и С.

Дерново-подзол литобарьерный глинисто-иллювиированный (разрез 4) формируется, как указано выше, на двучленных почвообразующих породах – в пределах почвенного профиля на глубине 73 см происходит литологическая смена мелкозернистого песка тяжелым суглинком. Верхняя песчаная часть почвенного профиля представлена горизонтами АУе, Е и ВНН, нижняя суглинистая – горизонтами D_i и D. Горизонт D_i отличается многопорядковой структурой и наличием тонких глинистых кутан на гранях структурных отдельностей.

Содержание $C_{орг}$ в изученных почвенных разрезах очень низкое, в основном <1% (табл. 1). Самые высокие значения (1,1–1,2%) определены в верхней части профиля (горизонты АУе и АУ_{pir}).

Почвы отличаются по характеру радиального распределения гексанового битумоида и его типу. В почвах на песчаных отложениях (разрезы 1–3) радиальное распределение битумоида носит аккумулятивный характер, максимальные значения наблюдаются в серогумусовом оподзоленном горизонте на глубине от 3 до 10 см и варьируют от 96–160 мг/кг (разрезы 1, 2) до 20 мг/кг (разрез 3). Тип битумоида в этих горизонтах маслянисто-смолистый (табл. 1). Ниже серогумусового горизонта в других почвенных горизонтах и в подстилающей породе битумоид отмечен в виде следов (<5 мг/кг – предела чувствительности метода). Связь содержания битумоида с концентрацией углеводов в свободном почвенном воздухе не отмечена. Распределение битумоида в почвах на двучленных отложениях (разрез 4) носит срединно-аккумулятивный характер с максимальным содержанием в горизонте ВНН (20 мг/кг). По всему профилю в остальных горизонтах содержание битумоидов находится на уровне 8–10 мг/кг, за исключением подстилающей породы, где отмечены только его следы (<5 мг/кг). Битумоид дерново-подзола литобарьерного глинисто-иллювиированного по всему профилю относится к легкому типу. Таким образом, можно предположить наличие связи между гранулометрическим составом почв и типом битумоида и особенностями его радиального распределения.

Т а б л и ц а 1

Параметры углеводородного состояния почв и содержание органического углерода

Разрез	Горизонт	Глубина, см	Тип битумоида	Содержание битумоида, мг/кг	Состав и содержание ПАУ, нг/кг	Максимальное содержание свободных УВ газов, ppm	C _{орг} , %
1	AYe фр.	3(8)–11	средний	160	нафталины, фенантрен; 20–130	13,5	1,1
	E1	11–40(44)	н.о.	<5			0,2
	E2	40(44)–50(53)	–«–	<5			0,0
	BHF	50(53)–64(75)	–«–	<5			0,1
	C	64(75)–110	–«–	<5			–
2	AY[e-hf]	6–10(12)	средний	96	нафталины, фенантрен; 10–80	0,5	0,8
	E	10(12)–16(34)	н.о.	<5			0,0
	BF	16(34)–39(46)	средний	8			0,5
	Eek	39(46)–61	н.о.	<5			0,1
	BHF	61–80	–«–	<5			–
	C	80–90	–«–	<5			–
3	AYe	2–9(10)	средний	5	нафталины; 5–55	16,5	0,5
	AYpir фр	9(10)–9(13)	средний	20			1,2
	E	9(13)–17(22)	н.о.	<5			0,1
	BFi	17(22)–30(32)	–«–	<5			0,4
	C1	30(32)–68	–«–	<5			0,0
	C2	68–112	–«–	<5			0,0
4	AYe	5–18(22)	легкий	10	нафталины, фенантрен, дифенил; 10–40	0,5	0,2
	E1	18(22)–24(32)	легкий	8			0,2
	E2	24(32)–37(44)	легкий	8			0,2
	BF	37(44)–73	легкий	20			0,0
	Di	73–94	легкий	8			0,1
	D1	94–124	легкий	5			0,0
	D2	124–130	н.о.	<5			0,1
	D3	130–145	–«–	<5			0,0

П р и м е ч а н и е. В скобках – максимальная глубина горизонта.

Исследованные почвы на ключевом участке характеризуются низким содержанием ПАУ (<0,1% в битумоиде и <0,05 мг/кг в почве; табл. 1). ПАУ представлены главным образом легкими низкоконденсированными соединениями с двумя кольцами – гомологами нафталина или дифенилом, на долю которых, включая 3-кольчатый фенантрен в единичных пробах, приходится ≥85% от суммы всех ПАУ. В отдельных образцах обнаружены флуорен и антрацен (3-кольчатые ПАУ), хризен, пирен и тетрафен (4-кольчатые ПАУ), 5- и 6-кольчатые ПАУ не обнаружены. Распределение ПАУ в почвах носит аккумулятивный характер, для некоторых индивидуальных соединений ПАУ наблюдается небольшой локальный максимум в иллювиальном горизонте.

Удерживаемый почвенный воздух в исследованных почвах характеризуется широким спектром газообразных УВ, среди которых обнаружены в основном метан и этилен. Другие углеводороды ряда

C₂–C₄ находятся на уровне следовых количеств. Метан и этилен, как правило, обнаружены в пределах всего почвенного профиля. Максимальное содержание метана в удерживаемом почвенном воздухе приурочено к гумусовым оподзоленным горизонтам и достигает 17 ppm, этилена – 65 ppm. Следы других углеводородов (в том числе непредельных) обнаружены преимущественно в гумусовых оподзоленных горизонтах. Отметим, что почвы, формирующиеся на двучленных отложениях (разрез 4), как в песчаных, так и в суглинистых горизонтах, в среднем характеризуются в 2–3 раза более высоким содержанием УВ газов в удерживаемом почвенном воздухе, чем почвы на песчаных породах (разрезы 1–3). Радиальное распределение удерживаемых УВ газов в почвах, как и в случае с ПАУ, носит аккумулятивный характер. Для метана небольшой локальный максимум наблюдался в иллювиально-железистых горизонтах почв.

Таблица 2

Содержание углеводородных газов в удерживаемом почвенном воздухе в погребенном торфяном горизонте и сопряженных пластах

Горизонт	Глубина от поверхности, м	Содержание удерживаемых газов, ppm		
		метан	этилен	другие УВ газы, C ₂ –C ₄
Песчаный	4,5	2,0	0,8	0,4
Торфяной	5,0	324,0	3,1	1,5
Глинистый	5,5	2946,0	5,0	2,5

Показательно распределение удерживаемых почвенных газов, отобранных из зачистки на высокой пойме р. Кокшеньга, где на глубине 5 м под песчаным горизонтом был вскрыт погребенный торфяной пласт (мощность ~50 см), подстилаемый глинистыми отложениями. В пределах обнажения содержание УВ газов в удерживаемом почвенном воздухе увеличивается с глубиной – максимальная концентрация УВ газов обнаружена в глинистом горизонте. Концентрация метана здесь на порядок превышает таковую в вышележащих торфяном горизонте и на 3 порядка в песчаном горизонте (табл. 2). Значение концентрации этилена и других газов в удерживаемом почвенном воздухе глинистого и торфяного горизонтов в целом повторяют распределение метана. Полученные данные о распределении УВ газов показывают, что газовый поток не мог генерироваться в торфяном пласте, а шел снизу, т.е. он имеет эманационное происхождение. Глинистый и торфяной горизонты, как обладающие более высокой сорбционной способностью, выступают в качестве барьеров на пути миграции УВ. Отметим, что по особенностям состава и концентрации УВ газов самый верхний песчаный горизонт обнажения близок к исследованным почвам (разрезы 1–4).

Особенности состава УВ почвенного комплекса позволяют отнести УВС исследованных почв к биогеохимическому типу. Характерные черты этого типа – в целом низкое содержание гексанового битумоида и ПАУ, состав полиаренов определяется легкими низкоконденсированными соединениями. По результатам полевых газометрических работ можно выделить наложенный эманационный тип УВС почв для торфяно-подзолов иллювиально-железисто-гумусовых (разрез 1) и дерново-подзолов иллювиально-железистых постпирогенных (разрез 3).

Полученные данные УВС исследованных среднетаежных почв на участке «Кокшеньга» сопоставлены с опубликованными ранее характеристиками УВС фоновых южнотаяжских почв [Краснопеева, 2008; Краснопеева, Пузанова, 2011]. Преобладающий тип УВС для южнотаяжских почв определен как биогеохимический. Содержание гексановых битумоидов в дерново-подзолистых почвах южной тайги было низким – <200 мг/кг. Суммарное содержание ПАУ, в которых преобладали низкомолекулярные структуры, не превышало 0,3 мг/кг. В то же время для болотных торфяных фоновых почв южнотаяжских ландшафтов было характерно более высокое содержание гексанового битумоида (до 500 мг/кг) при сходных составе и содержании ПАУ. Таким образом, сравнение полученных нами данных УВС почв среднетаежных ландшафтов с литературными данными УВС почв южнотаяжских ландшафтов показывает, что подзолы средней тайги и дерново-подзолистые почвы южной тайги ближе между со-

бой по содержанию битумоида, чем дерново-подзолистые и болотные почвы, формирующиеся в одной ландшафтной подзоне – южной тайге. Это указывает на то, что характер локального увлажнения играет более важную роль в формировании УВС почв, чем подзональные биоклиматические различия. В некоторых почвах южнотаяжских ландшафтов обнаружена повышенная концентрация УВ газов в свободном почвенном воздухе (до 1000 мг/м³), что мы трактуем как результат воздействия восходящих глубинных потоков.

Выводы:

– для углеводородного состояния почв фоновых среднетаежных ландшафтов характерно низкое содержание гексанового битумоида – от следового количества до 160 мг/кг. Тип битумоида легкий для почв, формирующихся на песчаных отложениях, средний – для почв, формирующихся на двучленных отложениях; в этих почвах выявлено низкое содержание полициклических ароматических углеводородов (<150 нг/г) с преобладанием легких полиаренов, что соответствует биогеохимическому типу УВС почв;

– в некоторых почвах на исследованной территории можно выделить наложенный эманационный тип УВС, отличающийся от биогеохимического повышенным содержанием суммарных углеводородов в свободном почвенном воздухе. Это явление наблюдается только в почвах, имеющих в пределах всего профиля песчаный гранулометрический состав. Глубокие почвенные горизонты суглинистого состава и водонасыщенные горизонты (в болотных почвах) выступают в качестве геохимического барьера на пути восходящих потоков углеводородных газов;

– повышенные значения концентрации УВ в удерживаемом почвенном воздухе погребенных торфов и нижележащих глинистых горизонтов, обнаруженные на исследованной территории, свидетельствуют о поступлении газообразных УВ в почвы с глубинными эманациями;

– при сравнении УВС почв фоновых средне- и южнотаяжских ландшафтов установлено, что характер локального увлажнения играет более важную роль в формировании УВС почв, чем подзональные биоклиматические различия.

Благодарности. Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-17-00193).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеева Т.А., Теплицкая Т.А. Спектрофлуориметрические методы анализа полициклических ароматических углеводородов в природных и техногенных средах. Л.: Гидрометеониздат, 1981. 215 с.
- Ариунушкина Е.В. Руководство по химическому анализу почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1970. 490 с.
- Гаврилова И.П., Горбунова И.А. Особенности текстурно-подзолистых иллювиально-железистых почв Архангельской учебно-научной станции МГУ // Геохимия ландшафтов и география почв. Смоленск: Ойкумена, 2002. С. 242–268.
- Геннадиев А.Н., Пиковский Ю.И., Жидкин А.П. и др. Факторы и модификации углеводородного состояния почв // Почвоведение. 2015а. № 11. С. 1314–1329.
- Геннадиев А.Н., Пиковский Ю.И., Цибарт А.С., Смирнова М.А. Углеводороды в почвах: происхождение, состав, поведение (обзор) // Почвоведение. 2015б. № 10. С. 1195–1209.
- Краснопеева А.А. К методике люминесцентного анализа нефтепродуктов в почвах // Сб. мат-лов 2-й междунар. научн. конф. «Современные проблемы загрязнения почв». М.: факультет почвоведения МГУ имени М.В. Ломоносова, Докучаевское об-во почвоведов, РФФИ, 2007. Т. 2. С. 200–203.
- Краснопеева А.А. Природные битумоиды в почвах лесной зоны: люминесцентная диагностика и уровни содержания (Сатинский полигон МГУ) // Почвоведение. 2008. № 12. С. 1453–1465.
- Краснопеева А.А., Пузанова Т.А. Геохимический углеводородный фон в почвах южной тайги // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2011. № 3. С. 33–40.
- Методика выполнения измерений массовых концентраций предельных углеводородов C_1 – C_5 и непредельных углеводородов (этена, пропена, бутенов) в атмосферном воздухе, воздухе рабочей зоны и промышленных выбросах методом газовой хроматографии ПНД Ф 13.1.2:3.23-98. М.: ФГУ «ФЦАО», 2005. 20 с.
- Перельман А.И. Геохимия. М.: Высшая школа, 1979. 423 с.
- Пиковский Ю.И. Природные и техногенные потоки углеводородов в окружающей среде. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1993. 208 с.
- Пиковский Ю.И., Геннадиев А.Н., Краснопеева А.А., Пузанова Т.А. Углеводородные геохимические поля в почвах района нефтяного промысла // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2009. № 5. С. 28–35.
- Пиковский Ю.И., Геннадиев А.Н., Оборин А.А. и др. Углеводородное состояние почв на территории нефтедобычи с карстовым рельефом // Почвоведение. 2008. № 11. С. 1314–1323.
- Теплицкая Т.А., Алексеева Т.А., Оглоблина А.И. Принципы люминесцентно-спектральной диагностики токсичных и канцерогенных углеводородов // Техногенные потоки вещества в ландшафтах и состояние экосистем. М.: Наука, 1981. С. 100–117.
- Agarwal T., Khillare P.S., Shridhar V., Ray Sh. Pattern, sources and toxic potential of PAHs in the agricultural soils of Delhi, India // J. Hazardous Materials. 2009. Vol. 163, N 2–3. P. 1033–1039.
- Bayer C., Gomes J., Vieira F.C.B. et al. Methane emission from soil under long-term no-till cropping systems // Soil and Tillage Res. 2012. Vol. 124. P. 1–7.
- Cayot Ch., Lichtfouse E. $d^{13}C$ of plant-derived n-alkanes in soil particle-size fractions // Organic Geochem. 2001. Vol. 32. P. 253–258.

Поступила в редакцию 16.02.2016

Принята к публикации 18.03.2016

A.N. Gennadiev¹, Yu.I. Pikovskii², M.A. Smirnova³,
A.P. Zhidkin⁴, R.G. Kovach⁵

HYDROCARBON STATUS OF NATURAL SOILS IN TAIGA LANDSCAPES (SOUTHWESTERN PART OF THE USTYANSKOE PLATEAU)

The work is devoted to the study of natural features of the hydrocarbon status (HCS) of middle taiga soils with different texture and under different vegetation cover, soil aeration conditions, including soils forming under spontaneous free flow of hydrocarbon-rich gases. A comparison between the composition and content of the main components of HCS of studied middle taiga soils and published data of southern taiga soils was conducted; it is concluded that the local moisture conditions play a more important role in the formation of HCS of soils than subzonal bioclimatic differences. Biogeochemical type of HCS is predominant for natural soils. In some soils, the affiliated emanation type may be detected, which differs from the biogeochemical type mostly by the gas component of HCS.

Keywords: bituminous substances, polycyclic aromatic hydrocarbons, soil gases, soil forming factors, podzol, podzolic soils.

Acknowledgements. The study was financially supported by the Russian Science Foundation (project N 14-17-00193).

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography Department of Landscape Geochemistry and Soil Geography, Professor, D.Sc. in Geography; *e-mail:* alexagenna@mail.ru

² Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Landscape Geochemistry and Soil Geography, Leading Research Scientist, D.Sc. in Geography; *e-mail:* lummgu@mail.ru

³ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Landscape Geochemistry and Soil Geography, Research Scientist, PhD in Geography; *e-mail:* summerija@yandex.ru

⁴ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Landscape Geochemistry and Soil Geography, Research Scientist, PhD in Geography; *e-mail:* gidkin@mail.ru

⁵ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Landscape Geochemistry and Soil Geography, Research Scientist; *e-mail:* rkovach@yandex.ru

REFERENCES

- Agarwal T., Khillare P.S., Shridhar V., Ray Sh. Pattern, sources and toxic potential of PAHs in the agricultural soils of Delhi, India // J. Hazardous Materials. 2009. Vol. 163. no 2–3. P. 1033–1039.
- Alekseeva T.A., Teplickaja T.A. Spektrofluorimetricheskie metody analiza policiklicheskih aromaticskeh uglevodorodov v prirodnyh i tehnogenykh sredah [Spectrum fluorimetric methods for the analysis of polycyclic aromatic hydrocarbons in natural and technogenic landscapes]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1981, 215 p. (in Russian).
- Arinushkina E.V. Rukovodstvo po himicheskomu analizu pochv [Chemical analysis of soil]. Moscow, Izd-vo Moskovskogo un-ta, 1970, 490 p. (in Russian).
- Bayer C., Gomes J., Vieira F.C.B. et al. Methane emission from soil under long-term no-till cropping systems // Soil and Tillage Res. 2012. Vol. 124. P. 1–7.
- Cayet Ch., Lichtfouse E. $\delta^{13}\text{C}$ of plant-derived n-alkanes in soil particle-size fractions // Organic Geochem. 2001. Vol. 32. P. 253–258.
- Gavrilova I.P., Gorbunova I.A. Osobennosti teksturno-podzolistykh illjuvial'no-zhelezistykh pochv Arhangel'skoj uchebno-nauchnoj stancii MGU [The features of textural podzol illuvial-ferruginous soils of the Arkhangelsk research station of MSU], Smolensk, Ojkumena, Geohimija landshaftov i geografija pochv, 2002, pp. 242–268 (in Russian).
- Gennadiev A.N., Pikovskij Yu. I., Smirnova M.A., Tsibart A.S. Hydrocarbons in soils: Origin, composition, and behavior (review) // Eurasian Soil Science. 2015b. Vol. 48. N 10. P. 1195–120.
- Gennadiev A.N., Pikovskij Yu.I., Zhidkin A.P. et al. Factors and features of the hydrocarbon status of soils // Eurasian Soil Science. 2015a. Vol. 48. N 11. P. 1193–1206.
- Krasnopeeva A.A. K metodike ljuminescentnogo analiza nefteproduktov v pochvah [Luminescent analysis of petroleum products in soils] // Proceedings of the II Intern. Conference «Modern Problems of Soil Pollution». Vol. 2. Moscow, 2007. P. 200–203 (in Russian).
- Krasnopeeva A.A. Natural bituminoids in soils of the forest zone: Luminescence diagnostics and content levels (Satino Research Station, Moscow State University) // Eurasian Soil Science. 2008. Vol. 41. P. 1282–1293.
- Krasnopeeva A.A., Puzanova T.A. Geohimicheskiy uglevodorodnyj fon v pochvah juzhnoj tajgi [Geochemical hydrocarbon background in soils of the southern taiga], Vestnik Moskovskogo Unversiteta, Seriya 5, Geografiya, 2011, no 3, pp. 33–40 (in Russian).
- Metodika vypolnenija izmerenij massovykh koncentracij predel'nykh uglevodorodov S1-S5 i nepredel'nykh uglevodorodov (jetena, propena, butenov) v atmosfernom vozduhe, vozduhe rabochej zony i promyshlennykh vybrosah metodom gazovoj hromatografii PND F 13.1:2:3.23-98 [Methods of measurement of mass concentrations of C_1 – C_5 saturated hydrocarbons and unsaturated hydrocarbons (ethene, propene, butene) in the ambient air, workplace air and industrial emissions by PND F 13.1 GC: 2: 3.23-98], Moscow, FGU «FCAO», 2005, 20 p. (in Russian).
- Perelman A.I. Geohimija [Geochemistry]. Moscow, Vysshaja shkola, 1979. P. 423 (in Russian).
- Pikovskij Yu.I. Prirodnye i tehnogennye potoki uglevodorodov v okruzhajushhej srede [Natural and technogenic streams of hydrocarbons in the environment], Moscow, Izd-vo Mosk. un-ta, 1993, 208 p. (in Russian).
- Pikovskij Yu.I., Gennadiev A.N., Krasnopeeva A.A., Puzanova T.A. Uglevodorodnye geohimicheskie polja v pochvah rajona nefljanogo promysla [Hydrocarbon geochemical fields in the soils of oil extraction area], Vestnik Moskovskogo Unversiteta, Seriya 5, Geografiya, 2009, no 5, pp. 28–34 (in Russian).
- Pikovskij Yu.I., Gennadiev A.N., Puzanova T.A. et al. Hydrocarbon status of soils in an oil-producing region with karst relief // Eurasian Soil Science. 2008. Vol. 41. N 11. P. 1162–1170.
- Teplickaja T.A., Alekseeva T.A., Ogloblina A.I. Principy ljuminescentno-spektral'noj diagnostiki toksichnykh i kancerogenykh uglevodorodov [Principles of luminescence-spectral diagnostics of toxic and carcinogenic hydrocarbons], Moscow, Nauka, Tehnogennye potoki veshhestva v landshaftah i sostojanie jekosistem, 1981, pp. 100–117 (in Russian).

Received 16.02.2016

Accepted 18.03.2016

УДК 550.84.094

Эн.Э. Асадулин¹, А.Ю. Мирошников²

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗНОРОДНЫХ ТЕРРИГЕННЫХ ДОННЫХ ОСАДКОВ В ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ КАРСКОГО МОРЯ ПО ГЕОХИМИЧЕСКИМ ПРИЗНАКАМ

Основной компонент донных осадков Карского моря – терригенный материал с огромных площадей водосбора крупнейших сибирских рек Обь и Енисей. Материал переносится преимущественно в форме взвесей и коллоидов и осаждается на геохимических барьерах река–море. На запад от п-ова Ямал часть Карского моря находится в стороне от главного направления речного сноса. Здесь более заметная роль в формировании донных осадков может принадлежать береговой абразии континента и арх. Новая Земля. Работа посвящена идентификации и группировке разнородных донных осадков западной части Карского моря на основании их геохимических особенностей. Установлено преобладание в осадках терригенного материала обского либо смешанного обско-енисейского геохимического типа. Широкое площадное распространение такого материала может происходить за счет миграции над соленой морской водой линз распресненных вод от эстуариев Оби и Енисея и осажде-ния транспортируемого терригенного материала на латеральном солевом геохимическом барьере. Области накопления минерального вещества иного происхождения, в частности за счет береговой абразии, трассируются повышенным или пониженным относительно обско-енисейского геохимического фона содержанием отдельных элементов и имеют меньшее площадное распространение.

Ключевые слова: Карское море, донные осадки, наносы Оби и Енисея, терригенное вещество, геохимические барьеры, информативные химические элементы, геохимическая идентификация.

Введение. Карское море отличается от всех морей российской Арктики наибольшим поступлением с континента пресных вод и терригенного осадочного материала, которые приносятся в первую очередь гигантскими речными системами Оби и Енисея. Среднегодовая суммарная масса речных наносов, по данным многих исследователей, превышает 27 млн т. Почти на таком же уровне оценивается количество твердых осадков, попадающих в Карское море за счет температурного и волнового разрушения его берегов [Михайлов, 1997; Васильев и др., 2006]. Терригенный материал с водосборных площадей Оби и Енисея концентрируется преимущественно в их эстуариях и на прилегающих участках морского бассейна, где происходит смешение пресных речных вод с солеными морскими. Эстуарии и дельты рек А.П. Лисицын рассматривает как первый глобальный уровень лавинной седиментации или маргинальный фильтр [Лисицын, 1988]. По А.И. Перельману, это геохимический макробарьер [Перельман, 1989], а Е.М. Емельянов трактует такие пограничные области, как «геохимические барьерные зоны» (ГБЗ), в которых проявляется несколько барьеров, включая солевой [Емельянов, 1998].

подавляющая часть нерастворенного терригенного материала и связанных с ним химических элементов переносится реками в дисперсной форме. Это взвеси (грубодисперсная система с размером частиц >0,5–1 мкм) и коллоиды (частицы размером <1–0,5 мкм). С точки зрения миграционных свойств главная особенность коллоидов – их противостоя-

ние седиментации в гравитационном поле. Поэтому для удаления материала из коллоидной дисперсной системы важно наличие геохимических барьеров, на которых может происходить коагуляция – укрупнение размеров частиц и их гравитационное осаждение. В ГБЗ Оби и Енисея задерживается основная масса терригенного материала, однако часть его все же проникает в открытое морское пространство и осаждается на большой площади шельфа в центральной и восточной частях Карского моря. Особое положение занимает район Карского моря на запад от п-ова Ямал. Здесь речной сток минимален, а поступающие через проливы Карские Ворота и Югорский Шар соленые воды из Баренцева моря формируют мощное Ямальское течение в северном и северо-восточном направлении. Соответственно, ведущую роль в поступлении терригенного материала на дно западной и юго-западной части Карского моря должна играть береговая абразия. Наиболее податливы разрушению песчано-глинистые берега п-ова Ямал, в меньшей степени – преимущественно скальные берега Новой Земли.

Тем не менее на западе Карского моря отмечается влияние стока Оби и Енисея, проявляющееся в гидрохимических особенностях морской воды, биологической продуктивности района и свойствах донных отложений [Розанов, 2015]. Один из феноменов Карского моря – приповерхностные линзы распресненных вод обского и енисейского происхождения, которые проникают в акваторию между Новой Землей и Ямалом [Маккавеев и др., 2010]. Площадь таких линз достигает нескольких сотен квад-

¹ Институт геологии рудных месторождений, минералогии, петрографии и геохимии Российской Академии наук (ИГЕМ РАН), лаборатория радиогеологии и радиогеоэкологии, ст. науч. с., канд. геол.-минерал. н.; e-mail: aasad@inbox.ru

² Институт геологии рудных месторождений, минералогии, петрографии и геохимии Российской Академии наук (ИГЕМ РАН), лаборатория радиогеологии и радиогеоэкологии, ст. науч. с., канд. геол.-минерал. н.; e-mail: alexey-miroshnikov@yandex.ru

ратных километров при мощности до 10 м. Граница распресненных вод с нижележащими солеными образует латеральный геохимический барьер, способствующий осаждению дисперсного материала. Авторы попытались установить по геохимическим данным наличие обской и енисейской терригенной составляющей в верхнем слое донных осадков в западной части Карского моря и оценить масштаб их распространения.

В начале 1990-х гг. в редкометальном отделении ИГЕМ РАН А.И. Перельман инициировал тематические исследования по геохимическому определению источников терригенного вещества и условий его накопления в морских сланцевых толщах палеозойского и более позднего возраста в связи с их редкометальной рудоносностью. В качестве характеризующих признаков геологических объектов использовались химически малоподвижные микроэлементы, способные сохранять информацию о материнских породах в процессе экзогенных преобразований. Помимо прикладного значения эти исследования должны были послужить развитию информационного аспекта анализа миграции [Перельман, 1989]. В тот же период были начаты работы по изучению состава современных речных и морских донных осадков с радиоэкологической точки зрения. При этом использован опыт обращения с геохимическими данными как носителями информации, уже полученный при изучении древних морских отложений. Работа авторов продолжает междисциплинарные исследования, которые координировал А.И. Перельман. Объект изучения – терригенные донные осадки Карского моря в его западной части между арх. Новая Земля и п-вом Ямал.

Материалы и методы исследований. Материалы получены при проведении ряда комплексных экспедиций на научно-исследовательском судне (НИС) ГЕОХИ РАН «Академик Борис Петров» в Карском море, Обской губе и Енисейском заливе. Подъем проб донных отложений осуществлялся на якорных станциях с помощью дночерпателя грейферного типа «Океан-0.25» и корабчатого пробоотборника (бокскорера). Для изучения осадков в западной части Карского моря использованы данные экспедиции 1995 г., когда дночерпателем опробовался только верхний «активный» слой отложений, но при большом числе (более 50) станций наблюдения. Преимущество этого материала, полученного таким образом, состоит в том, что станции располагались не только по профилям, но и по площади (рис. 1, а), все пробы проанализированы в одном месте на множество элементов с преобладанием литофильной группы. Пробы помещали в чистую герметично закрывающуюся пластиковую банку и в лабораторных условиях обезвоживали в сушильном шкафу при температуре ~60 °С. Содержание элементов в пробах определяли методом инструментального нейтронно-активационного анализа (ИНАА) в группе ядерно-физических методов анализа ИГЕМ РАН (руководитель А.Л. Керзин).

Наиболее информативны для установления происхождения осадочного материала – микроэлементы литофильной группы, которые мигрируют в нерастворенной форме в составе минеральных матриц дезинтегрированных горных пород, вторичных минералов кор выветривания, или будучи сорбированными на диспергированном материале. Среди агентов переноса в обской и енисейской воде преобладают глинистые минералы, гидроксиды железа и органические остатки. Геохимически инертная форма миграции характерна для многих элементов, но литофильная группа элементов лучше других сохраняет в экзогенных процессах концентрацию и взаимосвязи, унаследованные от материнских горных пород.

Осажденное на маргинальных фильтрах в эстуариях Оби и Енисея терригенное вещество в процессе длительного переноса от мест размыва многократно перемешивалось. Поэтому можно считать, что распределение концентрации геохимически более или менее инертных элементов в отложениях одинаковых фациальных обстановок эстуариев Оби и Енисея отражает обобщенные региональные геохимические профили водосборных площадей этих рек и имеет характерные отличия. В предыдущих работах на основе сопоставления представительных выборок проб донных осадков из эстуариев этих рек авторами выделены элементы, отличающиеся по среднему содержанию и корреляционным свойствам в обском и енисейском материале. Однако, если рассматривать концентрацию отдельных элементов в пробах или малочисленных выборках, геохимическое различие обского и енисейского материала будет не столь очевидным. При объединении информативных элементов по аналогии с применяемым в прикладной геохимии методом выделения аддитивных геохимических полей элементов-спутников оруденения можно получить пригодный для практического применения аддитивный геохимический критерий различия наносов обского и енисейского происхождения.

Такой бинарный классификатор был разработан следующим образом. Раздельно суммированы элементы, содержание которых выше в эстуарных осадках Оби, и элементы с более высокой концентрацией в эстуарии Енисея. Получили два аддитивных показателя, элементы которых коррелируют между собой и имеют повышенное содержание в обской либо в енисейской выборках (agi_1 и agi_2 соответственно):

$$agi_1 = 1/13(Rb+Cs+La+Ce+Nd+Sm+Eu+Yb+Lu+Hf+Ta+Th+U),$$

$$agi_2 = 1/4(CaO+Sc+Cr+Co).$$

Логарифм отношения этих показателей дает аддитивный геохимический критерий распознавания обских и енисейских терригенных отложений $agt_{O/E}$ с величинами решений, симметрично распределенными относительно нуля:

$$agt_{O/E} = \ln(agi_1/agi_2).$$

Положительные величины логарифма свидетельствуют в пользу обского осадочного материала, отрицательные – в пользу енисейского. Значения, близкие

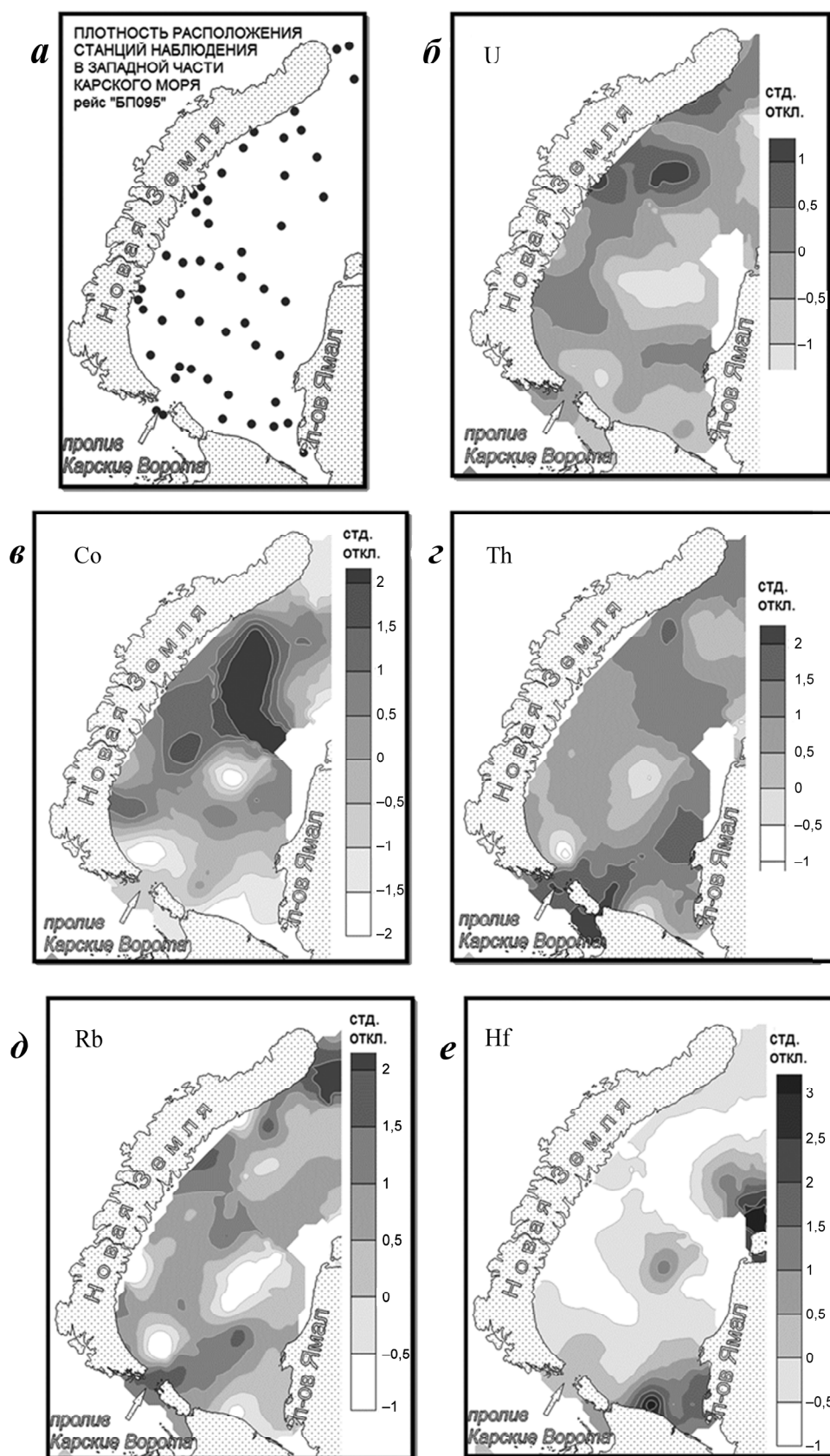


Рис. 1. План-схемы размещения станций наблюдения (а) и распределения химических элементов с проявленным группированием (б–е). Содержания элементов, преобразованные в стандартные отклонения от местного фона, показаны оттенками серого цвета

Fig. 1. Schemes showing (a) location of observational sites and (б–е) distribution of chemical elements and their groupings. Grey shading of different intensity corresponds to the content of elements converted into standard deviations from the local background values

к нулю, можно считать «отказом распознавания» либо предполагать перемешивание материала разного происхождения. Детальное описание разработки критерия с оценками вероятности ошибок, а также результаты его применения для центральной и восточной частей Карского моря приведены в публикациях авторов [Асадулин и др., 2013, 2015].

Необходимое условие для создания аддитивных формул – одинаковая размерность и одинаковая шкала измерений либо безразмерность составляющих частных признаков. Как известно, литосферные кларки химических элементов сильно отличаются в зависимости от порядкового номера элемента в периодической системе Менделеева (правило четности–нечетности Оддо–Гаркинса), т.е. кларки априори разномасштабны, что особенно ярко выражено в распространении редкоземельных элементов. Поэтому для многих операций с геохимическими данными наблюдаемые значения содержания элементов необходимо преобразовать в безразмерную форму – стандартизировать (выразить в долях стандартного отклонения разности между наблюдаемым значением и оценкой среднего) или нормировать на какие-либо условно-эталонные значения.

Для нормирования геохимических данных по осадочным породам с ведущей информационной ролью редкоземельных элементов принято использовать эталоны «постархейский австралийский сланец» (PAAS) или «северо-американский сланцевый композит» (NASC), что оправдано для терригенных морских и океанских отложений [Дубинин, 2006]. Авторами был выбран вариант NASC, рассчитанный по результатам нейтронно-активационного анализа и содержащий не только редкоземельные элементы [Gromet et al., 1984]. Для оценки изменчивости содержания отдельных элементов относительно локального фона Карского моря использована стандартизация измеренных содержаний.

Как уже отмечалось, разработанный ранее аддитивный геохимический критерий представляет собой бинарный классификатор, который в любом случае выдает решение либо «из Оби», либо «из Енисея». Наличие в осадках из западной части Карского моря существенных порций терригенного материала из иных источников сноса порождает проблемы при распознавании обской или енисейской составляющей отложений с помощью этого критерия. Поэтому для оценки степени сходства кривых на элементограммах частных проб с обским и енисейским геохимическими эталонами авторы дополнительно к аддитивному критерию использовали так называемое косинусное расстояние ($\cos\theta$). Эта мера сходства, широко применяемая в кластерном и факторном анализе, вычисляется подобно коэффициенту корреляции и численно совпадает с ним при использовании стандартизированных данных [Дэвис, 1990]. Разница состоит в том, что наблюдения (пробы, эталоны, классы) и их признаки (химические элементы) меняются местами.

Результаты исследований и их обсуждение. Анализ корреляционных связей химических компо-

нентов донных осадков из западной части Карского моря и сопоставление их с корреляционными матрицами по обскому и енисейскому материалу показал, что они достаточно высоко схожи. Во всех трех случаях наиболее выражена сильная положительная линейная корреляция большинства рассматриваемых микроэлементов с суммарным железом в форме Fe_2O_3 (коэффициент корреляции r варьирует от +0,31 до +0,87 при 95%-ном уровне значимости 0,24). Соответственно, эти элементы связаны и между собой, что вполне объяснимо с точки зрения преобладающих форм их водной миграции, о чем упоминалось выше. Единственный элемент, для которого выявлена высокая значимая отрицательная корреляция с железом, – гафний: $r = -0,67$, при сходной величине r в эстуарии Оби ($r = -0,61$) и отсутствии такой корреляции в эстуарии Енисея.

Естественно ожидать, что сильно коррелирующие с железом и между собой элементы должны иметь сходные вариации содержания по площади наблюдений. Однако для части элементов установлена некоторая собственная пространственная сгруппированность повышенного и пониженного содержания, различающаяся по месту положения (рис. 1, б–д). Содержание элементов здесь представлено в стандартизированном виде, т.е. в величинах стандартного отклонения от оценки геохимического фона донных осадков Карского моря. На схемах они выражены оттенками серого цвета. U и Co концентрируются примерно вдоль новоземельского побережья у одноименного желоба. Для Co (ярче) и Th (слабее) вырисовывается полоса, протягивающаяся поперек желоба от Новой Земли до п-ова Ямал. В целом распределение Th достаточно ровное, с небольшим повышением у пролива Карские Ворота и у Ямала вблизи Байдарацкой губы. Там же, на юге, а также недалеко от берегов северной части Новой Земли повышается содержание Rb. Высокая концентрация Hf локализована на самом юге Карского моря у Байдарацкой губы и особенно повышена у северной оконечности п-ова Ямал (рис. 1, е). Кроме того, для изученных элементов вырисовываются участки пониженных значений концентрации, протягивающиеся от пролива Карские Ворота в северо-восточном направлении.

По аддитивному геохимическому критерию почти все пробы с 50 наблюдательных станций в западной части Карского моря определены как «обские». Пять проб со станций со стороны новоземельского побережья можно интерпретировать как «неуверенно енисейские» или как смешанные. Две пробы почти у берега в северной части Новой Земли показали отчетливую енисейскую принадлежность, но этот результат оказался ошибочным, так как величины аддитивного критерия были искажены аномально высокими содержаниями Са, возможно, органического происхождения. Это побудило исключить СаО из аддитивной формулы при дальнейшем использовании.

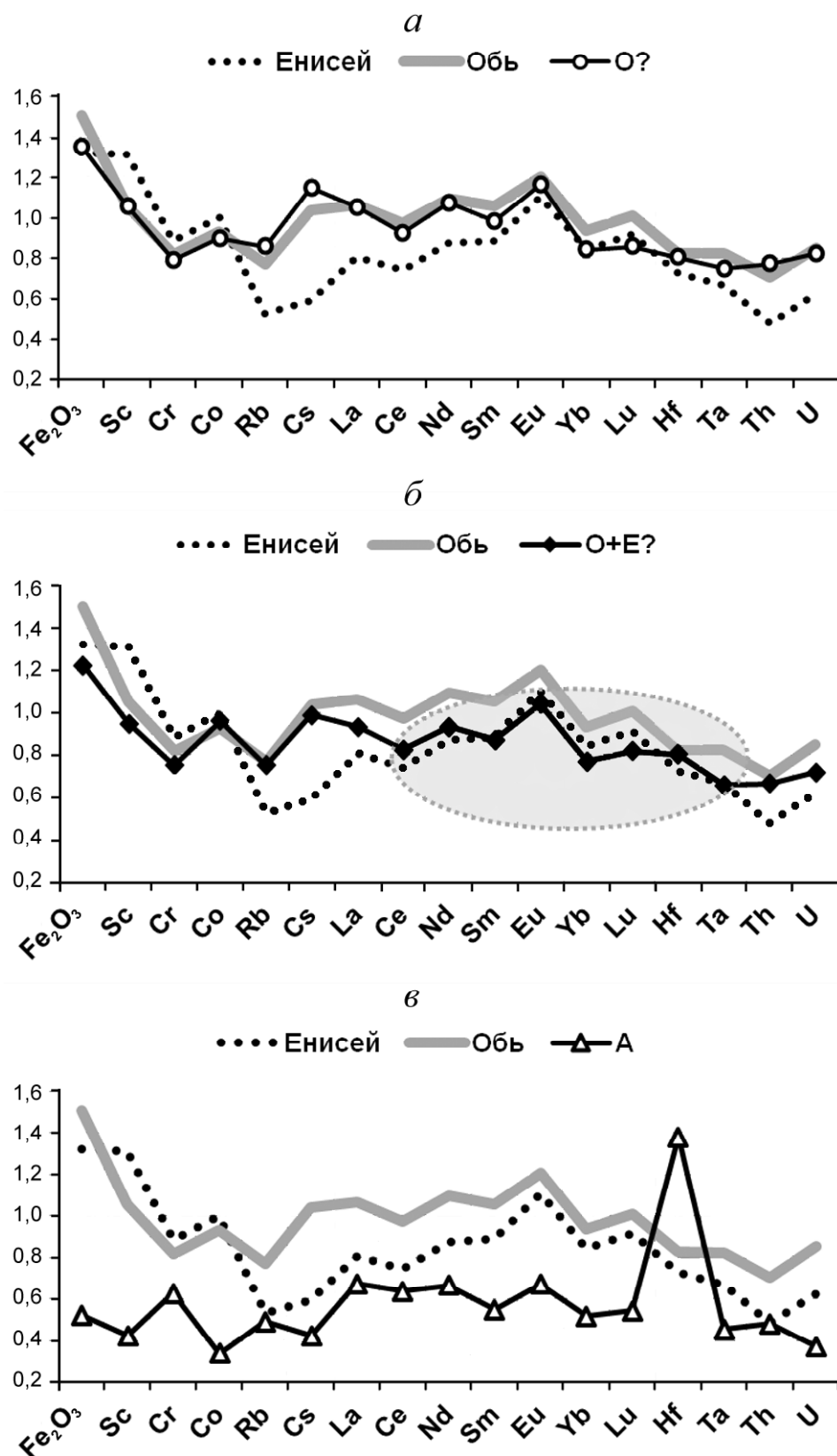


Рис. 2. Элементогаммы сопоставления разновидностей геохимических профилей донных осадков западной части Карского моря с эталонами для Оби и Енисея: *a* – осадки, похожие на обские, кривая «О?»; *б* – смешанный тип, кривая «О+Е?», эллипсом отмечена часть кривой, соответствующая енисейскому эталону; *в* – аномальный по отношению к обскому и енисейскому эталонам тип осадков, кривая «А». По оси ординат – содержание элементов, нормированное на NASC

Fig. 2. Element plots displaying the correlation of diverse geochemical profiles of bottom sediments in the western Kara Sea with the Ob' and Yenisei standards: *a* – sediments of the Ob' type, «O?» curve; *б* – sediments of mixed type, «O+Ye?» curve, ellipse marks the part of the curve corresponding to the Yenisei standard; *в* – anomalous type of sediments with respect to the Ob' and Yenisei standards, curve «A». Y-axis shows content of elements normalized to NASC

Для проб со всех наблюдательных станций построены элементограммы – графики содержания элементов, нормированного на NASC. При последовательном визуальном сравнении на элементограммах кривых частных проб с эталонными кривыми для Оби и Енисея все данные рассортированы по трем группам. Первую группу, самую многочисленную, составили пробы с формой кривых, практически совпадающей с обским эталоном. Во второй группе одни элементы распределились на графике по обскому типу, другие – по енисейскому или заняли промежуточное положение. Среди западнокарских донных осадков не обнаружено проб, близких к енисейскому геохимическому типу по всему спектру элементов. Третью группу образовали несколько проб, которые можно считать аномальными по отношению ко всем остальным. В этих пробах фиксируется резко пониженное содержание большинства элементов, но с отдельными положительными пиками некоторых из них. Одна такая проба отобрана недалеко от северного берега Новой Земли, две пробы – в центре западной части Карского моря и три – у пролива Карские Ворота.

На рис. 2 представлены элементограммы, на которых среднегрупповые кривые нормированных значений содержания элементов сравниваются с речными эталонами. Видно, что элементограмма для первой группы проб (рис. 2, а) практически тождественна с обским эталоном. На элементограмме для второй группы (рис. 2, б) ближе всего к енисейскому типу расположены легкие редко-

земельные элементы Ce, Nd, Sm, Eu, а также Ta. Значения Sc, Cr, Rb, Cs и Th, наоборот, распределены по обскому типу. На третьей элементограмме (рис. 2, в) для аномальных проб преимущественно с низким содержанием элементов можно отметить приближение к енисейскому типу значений для Rb, Cs, La, Ce и Th. Торий здесь занял противоположную позицию по сравнению с первыми двумя группами. Совершенно обособленно выделился пик Hf.

Для количественного отображения степени геохимического сходства западнокарских донных осадков с обским или енисейским эталонами вычислены значения $\cos\theta$. Эта мера сходства в данном случае будет играть роль «коэффициента корреляции» между кривыми элементограмм. Величина «+1» означает полное сходство, величина «-1» – полное несходство (кривые в противофазе). Рис. 3 иллюстрирует пространственное распределение результатов. На рис. 3, а оттенки серого цвета оконтуривают области осадков с разной степенью их сходства с обским эталоном, на рис. 3, б – с енисейским. Соответствие оттенков градациям величин $\cos\theta$ приведено в легенде. Обилие средне- и темно-серых тонов на первой схеме свидетельствует о доминировании обского типа распределения. Осветление участков отражает увеличение в осадках доли иного материала. Судя по преобладанию самых светлых градаций серого цвета на рис. 3, б, доля материала енисейского типа относительно обского достаточно мала.

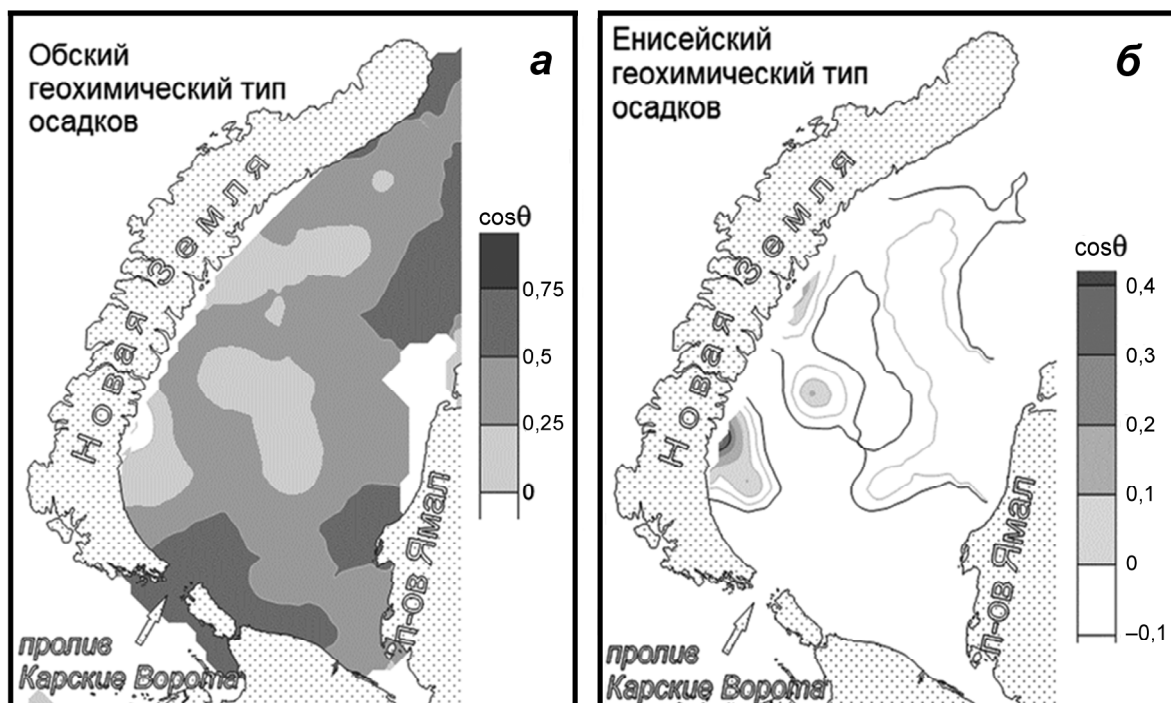


Рис. 3. План-схемы распределения в западной части Карского моря донных осадков, похожих на обский геохимический тип (а) и енисейский геохимический тип (б) по величинам «косинусного расстояния» как меры сходства. Оттенки серого цвета соответствуют градациям величины $\cos\theta$, рассчитанной по стандартизированным содержаниям элементов

Fig. 3. Schemes showing the distribution of bottom sediments in the western Kara Sea, (a) sediments of Ob' geochemical type and (b) Yenisei geochemical type, according to the values of «cosine distance» as a similarity measure. Grey shading of different intensity corresponds to the gradation value of $\cos\theta$ calculated on the basis of standardized element concentrations

Выводы:

– пробы донных осадков из западной части Карского моря по микроэлементному составу, как правило, соответствуют обскому геохимическому типу либо обнаруживают и обские, и енисейские признаки одновременно. Диагностируемые с такими признаками отложения фиксируются почти повсеместно, обский тип преобладает. Распространение материала обского и енисейского геохимических типов имеет площадной характер с участками больших размеров, без выраженной линейности. Соответственно, должна существовать система переноса взвешенных и коллоидных частиц от эстуариев Оби и Енисея в западную часть Карского моря и их площадного выпадения в осадок. Таким условиям отвечают обнаруженные в Карском море огромные по площади

приповерхностные линзы распресненных вод из Оби и Енисея. На их контакте с нижележащими солеными водами образуется латеральный солевой геохимический барьер. Преобладание в составе донных осадков терригенного материала обского геохимического типа, скорее всего, связано с большей насыщенностью вод Оби взвешенным и коллоидным веществом по сравнению с водами Енисея;

– повышенное относительно фона содержание отдельных микроэлементов, которые концентрируются на небольших участках ближе к берегам, может быть признаком поступления порций терригенного материала за счет береговой абразии без обширного рассеяния по дну моря. Наиболее характерно в этом отношении распределение концентрации гафния.

Благодарности. Работа выполнена за счет Российского научного фонда (проект № 14-17-00764).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Асадулин Э.Э., Мирошников А.Ю., Величкин В.И. Геохимическая специализация донных осадков в зонах смещения вод Оби и Енисея с водами Карского моря // Геохимия. 2013. № 12. С. 1116–1129.

Асадулин Э.Э., Мирошников А.Ю., Усачева А.А., Величкин В.И. Геохимическое распознавание терригенного материала из Оби и Енисея в донных осадках восточной части Карского моря // Докл. РАН. 2015. Т. 461, № 2. С. 207–209.

Васильев А.А., Стрелецкая И.Д., Черкашев Г.А., Ваништейн Б.Г. Динамика берегов Карского моря // Криосфера Земли. 2006. Т. 10, № 2. С. 56–57.

Дубинин А.В. Геохимия редкоземельных элементов в океане. М.: Наука, 2006. 360 с.

Дэвис Дж.С. Статистический анализ данных в геологии: Пер с англ. Кн. 2. М.: Недра, 1990. 427 с.

Емельянов Е.М. Барьерные зоны в океане: Осадко- и рудообразование, геоэкология. Калининград: Янтарный сказ, 1998. 416 с.

Лисицын А.П. Лавинная седиментация и перерывы в осадконакоплении в морях и океанах. М.: Наука, 1988. 309 с.

Маккавеев П.Н., Стунжас П. А., Хлебонашев П. В. О разделении вод Оби и Енисея в распресненных линзах Карского моря в 1993 и 2007 гг. // Океанология. 2010. Т. 50, № 5. С. 740–747.

Михайлов В.Н. Устья рек России и сопредельных стран: прошлое, настоящее и будущее. М.: ГЕОС, 1997. 413 с.

Перельман А.И. Геохимия. М.: Высшая школа. 1989. 528 с.

Розанов А.Г. Геохимия донных отложений Карского моря к западу от п-ова Ямал // Океанология. 2015. Т. 55, № 2. С. 291–300.

Gromet P.L., Dymek R.F., Haskin L.A., Korotev R.L. The «North American shale composite»: Its compilation, major and trace element characteristics // Geochim. et Cosmochim. Acta. 1984. Vol. 48, N 12. P. 2469–2482.

Поступила в редакцию 01.03.2016

Принята к публикации 16.03.2016

En.E. Asadulin¹, A.Yu. Miroshnikov²

**GEOCHEMICAL VARIABILITY
OF TERRIGENOUS BOTTOM SEDIMENTS
IN THE WESTERN KARA SEA**

The main component of the Kara Sea bottom sediments is terrigenous material from the huge catchment area of the largest Siberian rivers Ob' and Yenisei. The rivers carry this material mainly in suspended and colloidal forms; its further precipitation occurs on geochemical barriers «river-sea». The territory located westward from the Yamal Peninsula represents the part of the Kara Sea that is beyond the main direction of river flows. Here coastal abrasion of the continent and Novaya Zemlya Archipelago plays the major role in accumulation of bottom sediments. This work is devoted to the identification and grouping of diverse bottom sediments of the western Kara Sea according to their geochemical characteristics. Terrigenous material of the Ob' or mixed Ob'-Yenisei geochemical type was found to predominate in the composition of bottom sediments. The wide areal distribution of this material likely results from the migration of the lenses of freshened water from the Ob' and Yenisei estuaries above the saline seawater and precipitation of suspended terrigenous material on the lateral saline geochemical barrier. The areas where material of different

¹ Institute of Ore Deposits, Mineralogy, Petrography and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences (IGEM RAS), Laboratory of Radiogeology and Radiogeocology, Senior Research Scientist, PhD in Geology and Mineralogy; e-mail: aasad@inbox.ru

² Institute of Ore Deposits, Mineralogy, Petrography and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences (IGEM RAS), Laboratory of Radiogeology and Radiogeocology, Senior Research Scientist, PhD in Geology and Mineralogy; e-mail: Alexey-miroshnikov@yandex.ru

origin is accumulated, particularly, supplied by coastal abrasion, are traced by elevated or reduced content of certain elements relative to the Ob'-Yenisei geochemical background. These territories have limited areal extent.

Keywords: Kara Sea, bottom sediments, Ob' and Yenisei river drift, terrigenous matter, geochemical barriers, informative chemical elements, geochemical identification.

Acknowledgements. The study was financially supported by the Russian Science Foundation (project N 14-17-00764).

REFERENCES

- Asadulin En.E., Miroshnikov A.Yu., Velichkin V.I.* Geokhimicheskaya spetsializatsiya donnykh osadkov v zonakh smesheniya vod Obi i Yeniseya s vodami Karskogo morya [Geochemical Signature of Bottom Sediments in the Mixing Zones of Ob and Yenisei Waters with Kara Sea Water], *Geokhimiya*, 2013, no 12, pp. 1116–1129 (in Russian).
- Asadulin En.E., Miroshnikov A.Yu., Usacheva A.A., Velichkin V.I.* Geokhimicheskoye raspoznavanie terrigennoy materiala iz Obi i Yeniseya v donnykh osadkakh vostochnoy chasti Karskogo morya [Geochemical recognition of terrigenous material from the Ob and Yenisei Rivers in bottom sediments of the eastern part of the Kara Sea], *Doklady RAN*, 2015, vyp 461, no 2, pp. 207–209 (in Russian).
- Davis J.C.* Statisticheskiy analiz dannykh v geologii [Statistics and Data Analysis in Geology], *Perevod. s angl. Kn. 2*, Moscow, Nedra, 1990, 427 p. (in Russian).
- Dubinin A.V.* Geokhimiya redkozemel'nykh elementov v okeane [Rare Earth Element Geochemistry in the Ocean], Moscow, Nauka, 2006, 360 p. (in Russian).
- Gromet P.L., Dymek R.F., Haskin L.A., Korotev R.L.* The «North American shale composite»: Its compilation, major and trace element characteristics // *Geochim. et Cosmochim. Acta*. 1984. Vol 48, N 12. P. 2469–2482.
- Lisitsyn A.P.* Lavinnaya sedimentatsiya i pereryvy v osadkonakoplenii v moryakh i okeanakh [Avalanche sedimentation and stratigraphical lacuna in seas and oceans], Moscow, Nauka, 1988, 309 p. (in Russian).
- Makkaveyev P.N., Stunzhas P.A., Khlebopashev P.V.* O vydelenii vod Obi i Yeniseya v raspresnennykh linzakh Karskogo morya v 1993 i 2007 gg. [The distinguishing of the Ob and Yenisei waters in the desalinated lenses of the Kara Sea in 1993 and 2007], *Okeanologiya*, 2010, vol. 50, no 5, pp. 740–747 (in Russian).
- Mikhailov V.N.* Ust'ya rek Rossii i sopredel'nykh stran: proshloye, nastoyashcheye i budushcheye [The River Mouths of Russia and adjacent countries: Past, present and future], Moscow, GEOS, 1997, 413 p. (in Russian).
- Perel'man A.I.* *Geokhimiya* [Geochemistry], Moscow, Vyssh. shkola., 1989, 528 p. (in Russian).
- Rozanov A.G.* Geokhimiya donnykh otlozheniy Karskogo morya k zapadu ot poluostrova Yamal [Geochemistry of the bottom sediments in the Kara Sea West of the Yamal Peninsula], *Okeanologiya*, 2015, vol. 55, no 2, pp. 291–300 (in Russian).
- Vasil'yev A.A., Streletskaya I.D., Cherkashev G.A. Vanshtein B.G.* Dinamika beregov Karskogo morya [The Kara Sea shores dynamics], *Kriosfera Zemli*, 2006, vol. 10, no 2, pp. 56–57 (in Russian).
- Yemel'yanov E.M.* Bar'yernyye zony v okeane: Osadko- i rudoobrazovaniye, geokologiya [The barrier zones in the ocean: Sedimentation and ore formation, geoeology], Kaliningrad: Yantarniy Skaz, 1998, 416 p. (in Russian).

Received 01.03.2016

Accepted 16.03.2016

ЮБИЛЕЙ

70-ЛЕТИЕ НИКОЛАЯ СЕРГЕЕВИЧА КАСИМОВА



16 мая 2016 г. исполнилось 70 лет Николаю Сергеевичу Касимову – одному из ведущих географов России, признанному лидеру ландшафтно-геохимического направления в современной географической науке, заведующему кафедрой геохимии ландшафтов и географии почв, академику РАН, президенту географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, советнику ректора университета.

Научная и педагогическая деятельность Николая Сергеевича Касимова неразрывно связана с географическим факультетом МГУ, который он окончил в 1968 г., где учился в аспирантуре, защитил кандидатскую (1972) и докторскую диссертации (1984) и прошел путь от младшего научного сотрудника кафедры геохимии ландшафтов и географии почв до заведующего этой кафедрой. В течение 25 лет (1990–2015) он занимал должность декана факультета, много сделав для развития факультета и укрепления его позиций в Московском университете, в отечественной и мировой географии. В 2000 г.

он был избран членом-корреспондентом (2000), а затем академиком РАН (2008).

Продолжая дело своих учителей А.И. Перельмана и М.А. Глазовской, выдающихся ученых России, Николай Сергеевич Касимов внес огромный вклад в развитие научных основ геохимии и биогеохимии ландшафтов. Им получены фундаментальные результаты в области геохимии и палеогеохимии степных и пустынных ландшафтов, аквальных ландшафтов дельт юга России (реки Волга, Дон, Кубань, Селенга), разработаны научно-методические основы эколого-геохимической оценки городов и городских ландшафтов, влияния горнодобывающей и ракетно-космической деятельности на окружающую среду, а также комплексного гидролого-геохимического анализа бассейновых систем (Селенга–Байкал). Н.С. Касимов возглавлял ряд международных российско-голландских проектов в Прикаспии, в течение 30 лет руководит эколого-геохимическими исследованиями в Монголии.

Фундаментальный вклад в науки о Земле и окружающей среде внесли книги Н.С. Касимова «Геохимия степных и пустынных ландшафтов» (1988), «Геохимия ландшафта» (совместно с А.И. Перельманом, 1999), «Биогеохимия» (совместно с В.Н. Башкиным, 2004), «Нефть и окружающая среда Калининградской области» (2008), «Экогеохимия ландшафтов» (2013).

Под редакцией Н.С. Касимова вышли в свет основополагающие труды «География, общество, окружающая среда» (в 7 т., 2004), «Современные глобальные изменения природной среды» (в 4 т., 2006–2012), «Экологический мониторинг ракетно-космической деятельности» (2011), «Регионы и города России: интегральная оценка экологического состояния» (2014) и др.

Николай Сергеевич Касимов успешно руководил созданием крупных картографических произведений – Экологического атласа России (2002), Ландшафтно-геохимической карты России (2013), ряда региональных экологических и медико-географических атласов. В настоящее время по его инициативе разрабатывается Национальный атлас Арктики.

Значительный вклад внес Николай Сергеевич в развитие географического и экологического образования в классических университетах страны в качестве председателя Научно-методических советов по географии, экологии и устойчивому развитию. Под его руководством разрабатывались все федеральные государственные образовательные стандарты «География» и «Экология и природопользование» за последние 25 лет. В МГУ в течение многих лет он читает лекционные курсы «Геохимия ландшафта» и «Геохимия природных и техногенных ландшафтов». Под его руководством защищено 14 кандидатских и 1 докторская диссертации. Всего им опубликовано около 350 работ в российских и международных изданиях.

Н.С. Касимов – главный редактор журналов «Geography. Environment. Sustainability» (с 2008 г.), «Вестник МГУ. Серия географическая» (1990–2015), член редколлегии и советов журналов «Известия РАН. Серия географическая», «Экология и жизнь», «Известия Русского географического общества»,

«Геодезия и картография», «Journal of Geography in Higher Education», «Regional Environmental Change» (2000–2013) и др.

Н.С. Касимов ведет большую и ответственную общественную работу – он первый вице-президент Русского географического общества, председатель общественного совета Министерства природных ресурсов и экологии РФ, член правительственной комиссии по вопросам природопользования и охраны окружающей среды, Бюро экспертного совета Российского научного фонда, Совета при Президенте Российской Федерации, Межведомственной комиссии по технологическому прогнозированию, председатель правления Технологической платформы «Технологии экологического развития» и др.

За большие заслуги в области научной, педагогической и организационной деятельности Николай Сергеевич Касимов награжден Орденом Дружбы (2005), медалью «В память 850-летия Москвы» (1997), нагрудными знаками «Почетный работник высшего профессионального образования РФ», «Почетный гидрометеоролог» и «Почетный геодезист». Он лауреат премий имени М.В. Ломоносова за педагогическую деятельность (1998) и за цикл научных работ (2000). Четырежды ему присуждались премии Правительства РФ (2001, 2004, 2008 и 2014). 29 апреля 2016 г. Председатель Попечительского совета Русского географического общества Президент РФ В.В. Путин вручил Н.С. Касимову за его научные труды Большую золотую медаль РГО.

Преданное служение науке, ответственное лидерство при достижении поставленных целей, поддержка и помощь коллегам и ученикам обеспечили Николаю Сергеевичу Касимову высокий авторитет и уважение в коллективах, с которыми он работал. Его высокая профессиональная требовательность и в то же время демократизм, глубокое понимание мотивов поведения человека всегда приводили к позитивным результатам в работе. Все сотрудники и студенты географического факультета МГУ желают Николаю Сергеевичу Касимову новых успехов в его научной, педагогической и организационной деятельности, крепкого здоровья и долгих творческих лет жизни.

*Коллектив географического факультета МГУ
Редколлегия журнала*

ПРАВИЛА ПОДГОТОВКИ СТАТЕЙ К ПУБЛИКАЦИИ В ЖУРНАЛЕ «ВЕСТНИК МОСКОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА. СЕРИЯ 5. ГЕОГРАФИЯ»

Журнал «Вестник Московского университета. Серия 5. География» публикует результаты оригинальных исследований в различных областях географической науки, теоретические, методические и обзорные статьи, представляющие интерес для мирового научного сообщества. К публикации также принимаются краткие сообщения (объем до 4 стр. или 4000 знаков с пробелами, до 2 рисунков и до 10 позиций в списке литературы), информация о научных конференциях и событиях, рецензии на книги. Представленные к опубликованию материалы должны соответствовать формальным требованиям журнала, пройти процедуру слепого рецензирования и получить рекомендацию к публикации на заседании редколлегии журнала. Решение о публикации принимается на основе научной значимости и актуальности представленных материалов. Статьи, отклоненные редакционной коллегией, повторно не принимаются и не рассматриваются.

Комплектность. Представленные в редакцию материалы должны включать направление с места работы (учебы) автора; текст статьи, подписанный всеми авторами; аннотацию статьи и ключевые слова на русском и английском языках; таблицы, рисунки и подписи к ним. Материалы (за исключением направления) представляются в распечатанном виде в двух экземплярах и в электронном виде на двух дисках (рисунки представляются на отдельном диске).

Структура и оформление статьи. На первой странице статьи необходимо указать УДК (печатается над заголовком статьи слева), инициалы и фамилию автора, название статьи. Внизу страницы в виде цифровых сносок для каждого автора указываются место работы, должность, ученая степень, адрес электронной почты. Информация о выполнении работы в рамках программы (проекта), о ее финансовой поддержке указывается в конце статьи. Изложение должно быть ясным, лаконичным и последовательным. Статья должна быть структурирована и включать рубрики: введение; материалы и методы исследований; результаты исследований и их обсуждение; выводы; список литературы.

Текст набирается шрифтом Times New Roman 12 кеглем через 2 интервала, с отступом абзацев 1,25 см. Страницы А4 имеют верхнее и нижнее поля 2 см, 2,5 см слева и 1,5 см справа; с нумерацией вверху страницы. Объем статьи не должен превышать 14–16 страниц (включая список литературы и таблицы) и не более 3–4 рисунков. Статьи большего объема могут быть опубликованы в исключительных случаях по решению редакционной коллегии.

Нумерация формул (сплошная по всей статье) указывается в скобках цифрами (1, 2 и т.д.) с правой стороны. Нумеруются только те формулы, на которые есть ссылки в тексте.

Список литературы приводится в конце статьи: сначала в соответствии с русским алфавитом, затем – с английским, по тексту статьи даются ссылки в квадратных скобках [Иванов и др., 1985]. Библиографическое описание дается в следующем порядке: фамилии и инициалы авторов, полное название монографии, место издания, издательство, год издания, страницы; для периодических изданий – фамилии и инициалы авторов, название статьи, название журнала, год выпуска, том, номера страниц. Для списка References (рекомендуем пользоваться ресурсом <http://www.translit.ru>) для русскоязычных позиций сделать транслитерацию ФИО авторов и названия работы; в квадратных скобках дать перевод названия на английский язык, транслитерацию выходных данных, в скобках (in Russian). Ссылки на иностранных языках остаются в оригинальном варианте. Пример оформления первой страницы и списка литературы см. на сайте журнала.

Таблицы печатаются на отдельной странице каждая, кегль 12, через 2 интервала. Нумеруются по порядку упоминания их в тексте арабскими цифрами. После номера должно следовать название таблицы. Все графы в таблицах должны иметь заголовки и быть разделены вертикальными линиями.

Иллюстрации предоставляются в 2 экз. распечатки отдельно от текста статьи (на обороте каждой иллюстрации карандашом следует указать номер рисунка и фамилии авторов) и на отдельном CD-диске. На иллюстрациях следует избегать лишних деталей и надписей (надписи рекомендуется заменять цифрами или буквами, разъяснение которых дается в подрисуночных подписях или в тексте). Линии на рисунках должны быть четкими (5–6 рix). Ширина рисунков не должна превышать 180 мм, высота – 240 мм. Шрифт буквенных и цифровых обозначений на рисунке Times New Roman (9–10-й кегль). Рисунки должны быть черно-белыми, рекомендуется применять разные типы штриховки (с размером шага, позволяющим дальнейшее уменьшение). Фото (2 экземпляра) должны быть черно-белыми, контрастными.

Подрисуночные подписи представляются на отдельной странице, кегль 12, через 2 интервала.

Статьи принимаются на географическом факультете в комнате 2108а. Тел. 8-495-939-29-23.

Электронный адрес редколлегии:

vestnik_geography@mail.ru

Плата за публикацию не взимается.