

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-

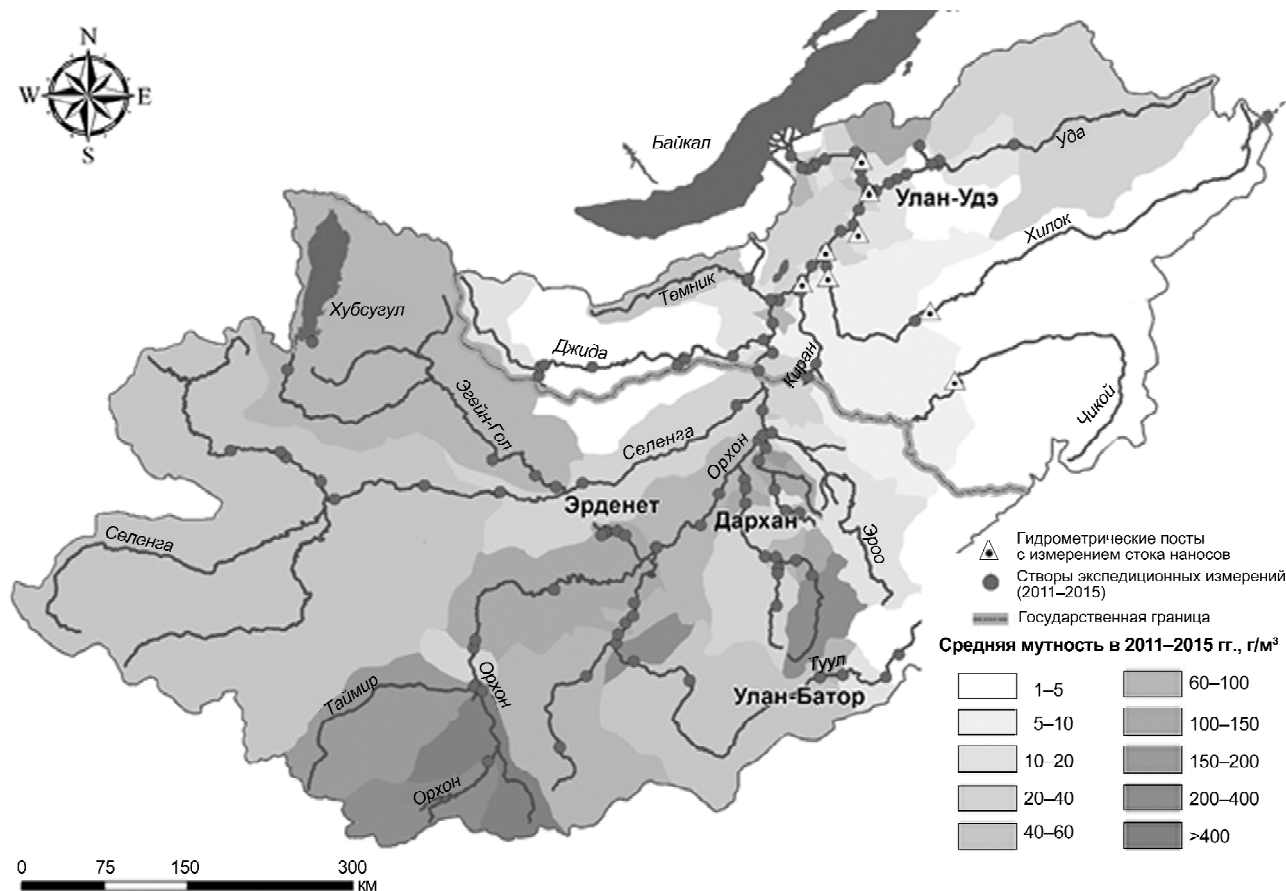


Рис. 1. Район бассейна р. Селенга

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 ($1,2 \text{ }^\circ\text{C}$) за последнее столетие в 2 раза превышал рост глобальной температуры, но был существенно ниже, чем над окружающей сушей ($2 \text{ }^\circ\text{C}$ 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			$C_{\text{орг}}$, %		
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 С_{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-

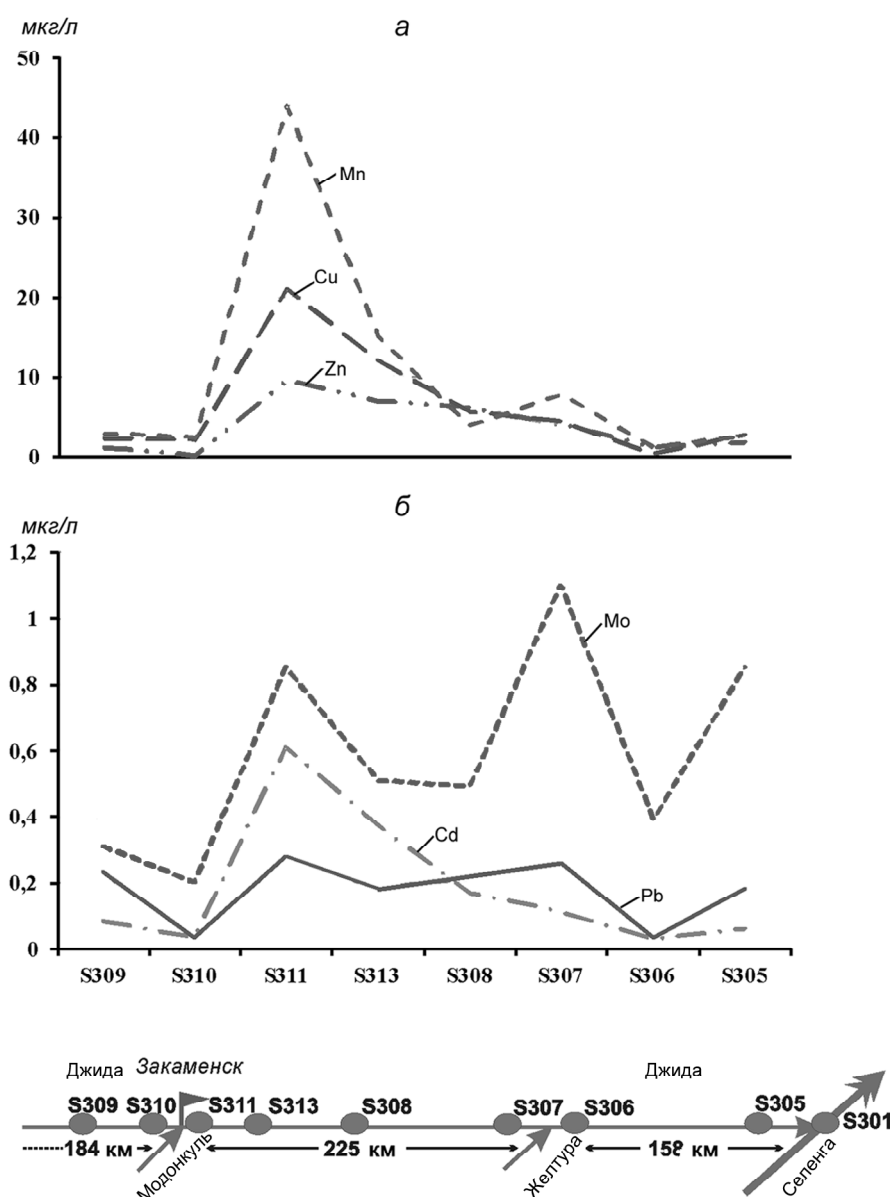


Рис. 2. Растворенные формы ТММ (мкг/л) в воде р. Джида (2013) от верховий (S310) через устье р. Модонкуль (S305): а – Cu, Zn, Mn; б – Mo, Cd, Pb

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-

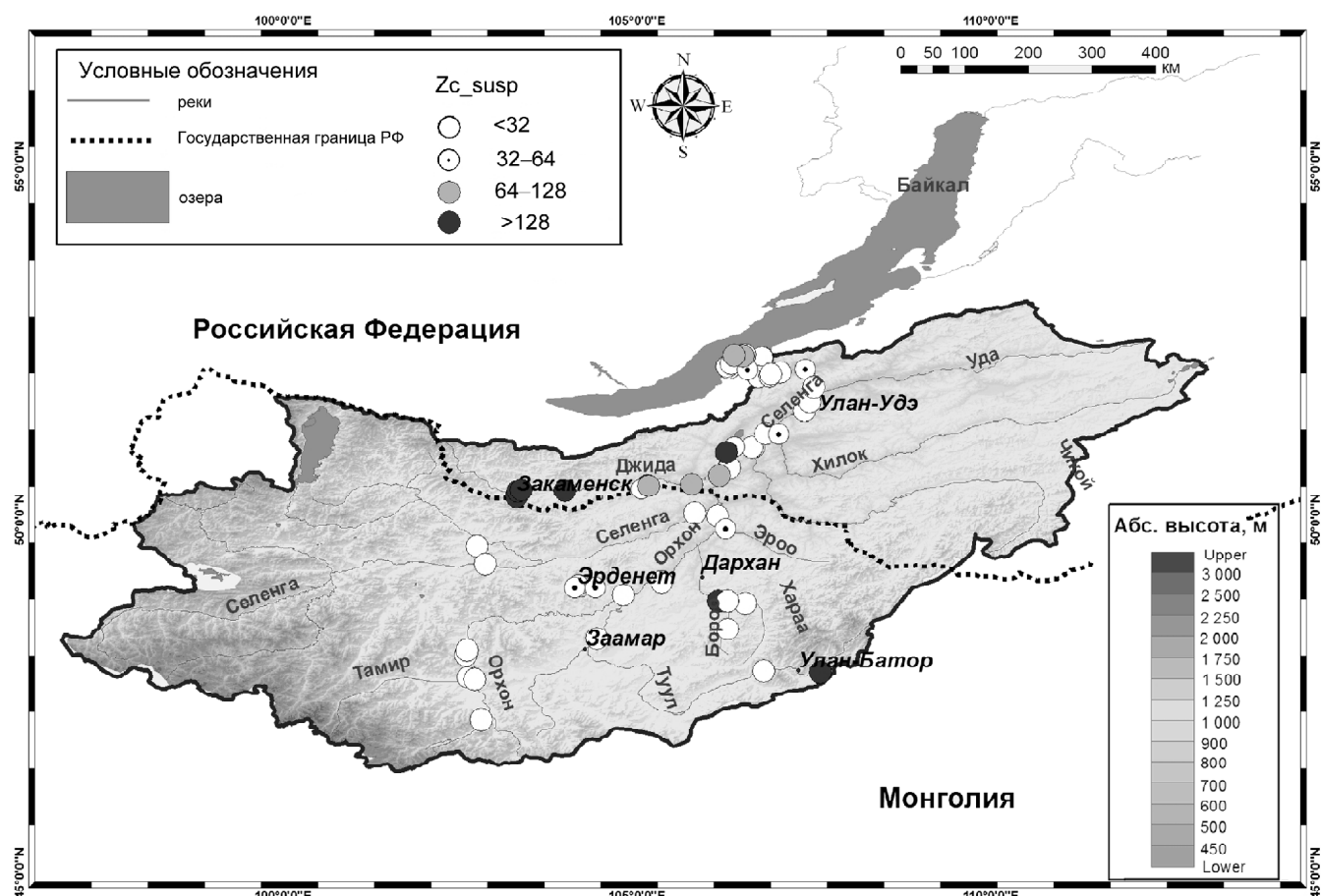


Рис. 3. Суммарный показатель загрязнения взвешенных наносов (паводок, июль-август 2011 г.)

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

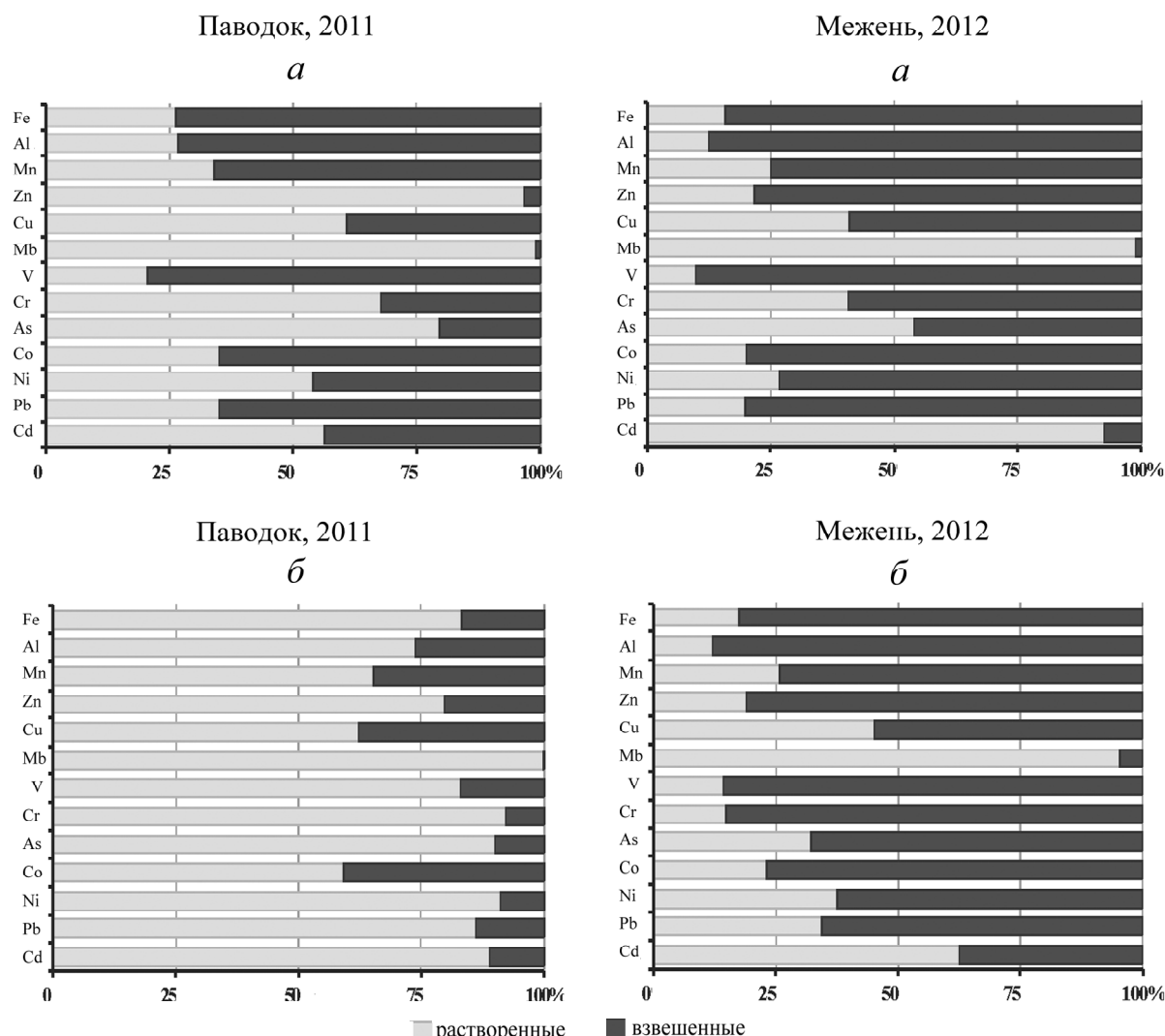


Рис. 4. Растворенные и взвешенные формы ТММ в р Селенга в период паводка 2011 г. и межени 2012 г.: а – граница России и Монголии – пос. Наушки; б – дельта Селенги

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 осажде-

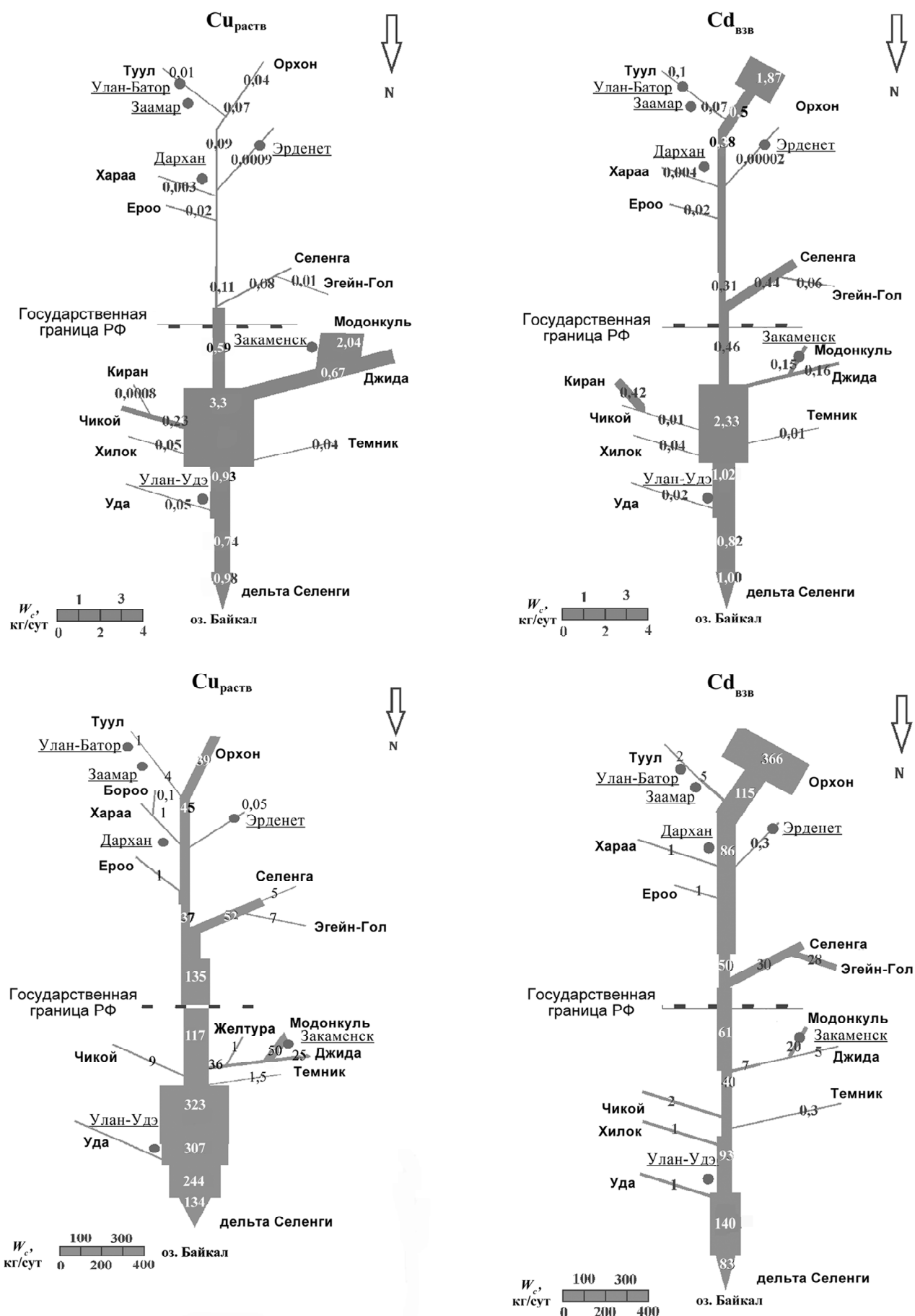


Рис. 5. Геохимические потоки Cd и Cu (кг/сут) в период летнего паводка, июль 2011 г.

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., Швец 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., Belozero 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], *Materijaly 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