



**Александр Ильич Перельман**  
**1916–1998**

**Московский государственный университет  
имени М.В. Ломоносова  
Географический факультет**

**Институт геологии рудных месторождений, петрографии,  
минералогии и геохимии Российской академии наук**

**Неправительственный экологический фонд  
имени В.И. Вернадского**

# **ГЕОХИМИЯ ЛАНДШАФТОВ**

**к 100-летию со дня рождения**

**Александра Ильича Перельмана**

**Под редакцией академика Н.С. Касимова  
и профессора А.Н. Геннадиева**

Москва  
2017

УДК 550.4: 631.4  
ББК 26.82  
Г 35

*Рецензенты:*  
чл.-корр. РАН В.А. Снытко,  
профессор А.В. Евсеев

Г 35 **Геохимия ландшафтов.** К 100-летию со дня рождения Александра Ильича Перельмана / Под ред. Н.С. Касимова, А.Н. Геннадиева. – М. : АПР, 2017. – 544 с. : ил.

**ISBN 978-5-904761-73-8**

Книга посвящена 100-летию со дня рождения Александра Ильича Перельмана. Развиваются положения, сформулированные им в процессе многолетних исследований геохимии ландшафтов и зоны гипергенеза различных регионов СССР.

Представлены новые взгляды на геохимические барьеры, геохимические ландшафты, радиоактивные и стабильные элементы, экогеохимию городов и углеводородное состояние ландшафтов. Приведены результаты анализа и моделирования ландшафтных и гипергенных процессов, форм миграции вещества. Во всех исследованиях прослеживается тесная связь почвенно- и ландшафтно-геохимических подходов, что свойственно научному творчеству А.И. Перельмана.

Техническая подготовка текстов выполнена Иваном Семеновым; редакция монографии – Еленой Достоваловой – выпускниками кафедры геохимии ландшафтов и географии почв.

Книга издана при поддержке Неправительственного экологического фонда имени В.И. Вернадского.

**УДК 550.4: 631.4**  
**ББК 26.82**

ISBN 978-5-904761-73-8

- © Кафедра геохимии ландшафтов и географии почв географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, 2017
- © Лаборатория радиогеологии и радиогеоэкологии имени Д.И. Щербакова ИГЕМ РАН, 2017

**Lomonosov Moscow State University  
Faculty of Geography**

**Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy  
and Geochemistry Russian Academy of Sciences  
The V.I. Vernadsky Nongovernmental Ecological Foundation**

# **LANDSCAPE GEOCHEMISTRY**

**100<sup>th</sup> Birthday of Alexander I. Perelman**

**Edited by N. S. Kasimov and A.N. Gennadiev**

Moscow  
2017

УДК 550.4: 631.4  
ББК 26.82  
Г 35

*Reviewers:*  
Corresp. member RAS V.A. Snytko  
Professor A.V. Evseev

**Landscape Geochemistry.** The 100<sup>th</sup> Birthday of A.I. Perelman / Edited by N.S. Kasimov and A.N. Gennadiev. Moscow : APR, 2017. – 544 p.

**ISBN 978-5-904761-73-8**

The monograph is devoted to the centenary of the birth of A.I. Perelman. The notions and concepts proposed by A.I. Perelman during his long-term research of landscape geochemistry in various regions of USSR are developed. New views on geochemical barriers, geochemical landscapes, radioactive and stable elements, ecogeochemistry of cities and hydrocarbon state of landscapes – are given. The results of the analysis and modeling of landscape processes are presented. In all the studies, there is a close link between soil and landscape-geochemical approaches, which is consistent with the scientific work of A.I. Perelman. Much attention is paid to migration phases of substances.

The technical preparation of the manuscript was made by Ivan Semenov; the monograph editing was executed by Elena Sostovalova - graduates of the department of landscape geochemistry and soil geography.

The book is published with the support of the V.I. Vernadsky Ecological Foundation.

- © Department of Landscape Geochemistry and Soil Geography, Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University, 2017
- © Scherbakov Laboratory of Radiogeology and Radioecology, Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry Russian Academy of Sciences, 2017

ISBN 978-5-904761-73-8

## ПОТОКИ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В БАССЕЙНЕ Р. СЕЛЕНГИ

*Н.С. Касимов, М.Ю. Лычагин, С.Р. Чалов,  
Г.Л. Шинкарева, М.К. Тарасов*

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 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 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 бассейна Селенги, трансграничного переноса загрязняющих веществ, их аккумуляции в дельте и выноса в оз. Байкал привлекает внимание исследователей многих стран (Алексеевский с соавт., 2013; Chalov et al., 2013; Inam et al., 2011; Thorslund et al., 2012; Karthe et al., 2014).

В настоящее время достаточно хорошо изучен химический состав речных вод (в основном российской части бассейна), проводится мониторинг содержания растворенных загрязняющих веществ в Селенге и ее основных притоках. Намного слабее исследован транспорт поллютантов со взвешенными наносами. Средняя плотность гидрометрических постов в бассейне невысокая: на российской территории – 1 пост на 3750 км<sup>2</sup>, на монгольской – почти в 4 раза меньше (1 пост на 16 500 км<sup>2</sup>). Систематические наблюдения за характеристиками качества воды осуществляются на еще более редкой сети гидрологических постов. Например, в пределах Российской Федерации мутность воды систематически определяется всего на 12 постах для четырех 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 км<sup>2</sup> расположен на территории Монголии (67%) и Российской Федерации (33% площади) (рис. 1). Селенга начинается от слияния рек Идэр и Дэлгэр-Мурэн и через 1024 км впадает в оз. Байкал. Как крупнейший приток озера, она ежегодно поставляет в Байкал около 30 км<sup>3</sup>/год воды, то есть 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 с соавт., 2014). Она характеризуется наличием средних и низких горных хребтов ( $H_{abc} = 800 - 2000$  м) в сочетании с широкими котловинами и речными долинами; сложным литогеохимическим фоном, обусловленным пестротой распространения массивных кристаллических пород кислого и основного состава, чередующихся с 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, то есть около половины населения Монголии; горно-обоганительный комбинат (ГОК) «Эрдэнэт» – 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 вольфрам-молибденового комбината.

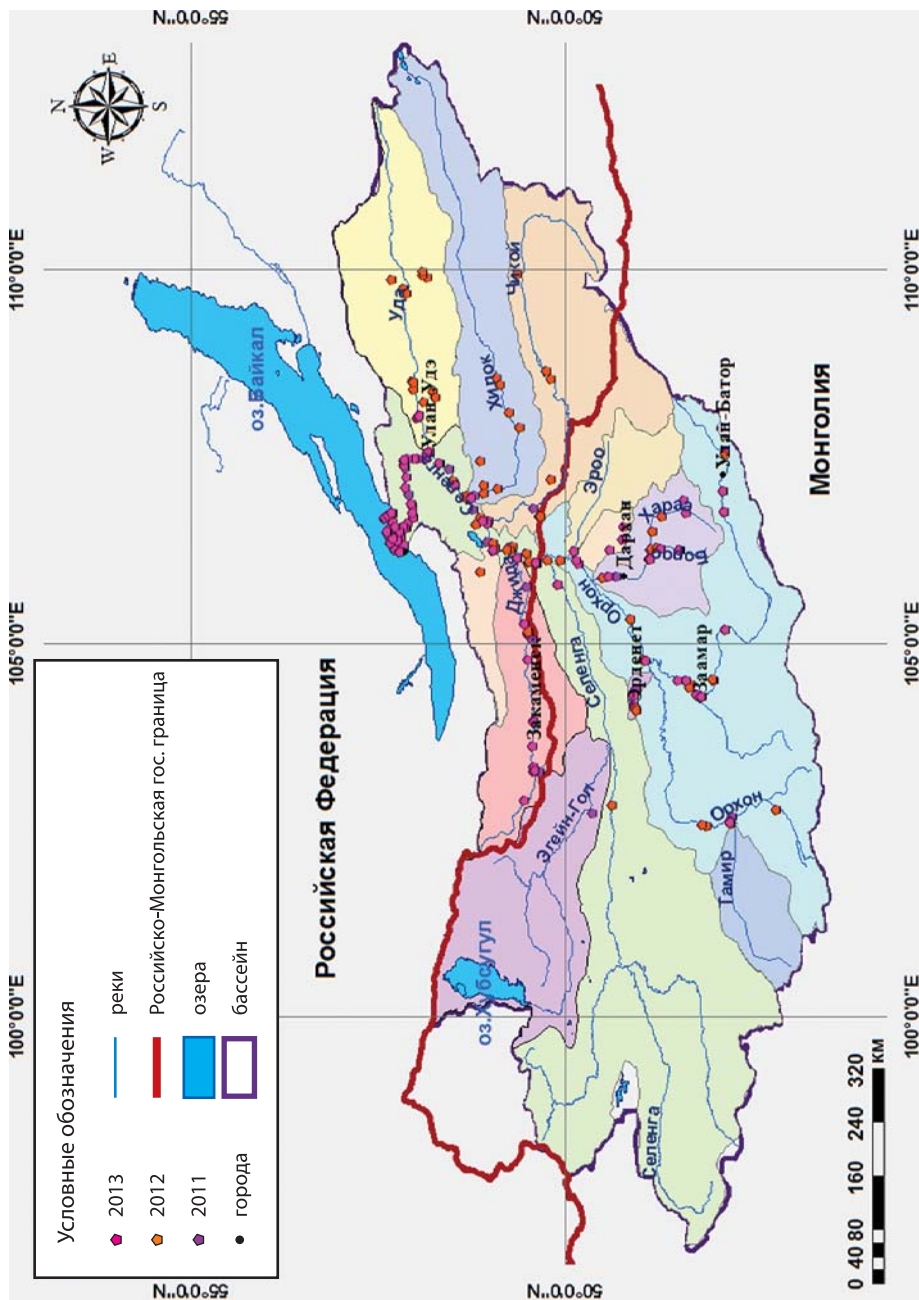


Рис. 1. Точки опробования водных объектов в бассейне Селенги (2011–2013 гг.)



Необходимо отметить и быстрое развитие сельского хозяйства в монгольской части бассейна, сопровождающееся загрязнением водных объектов и деградацией пастбищных земель (Огуреева с соавт., 2012).

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  $S_{cp} = \sum S/n$ , где  $n$  – количество лет, в которые проводились измерения.

В ходе полевых работ измеряли расходы воды, величину рН, окислительно-восстановительный потенциал (ORP), электропроводность, 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 стрежне потока пробы воды отбирали батометром-бутылкой. Взвешенные частицы осаждали 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 определяли на CHNS-анализаторе, либо по потере при прокаливании в муфельной печи при 400°C с предварительной обработкой концентрированной HCl для удаления карбонатов. Количество растворенного органического вещества определяли на анализаторе «Shimadzu TOC-L CPH» 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 им. 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 Федоровского (ВИМС).

Содержание химических элементов в воде сравнивали с российскими санитарно-гигиеническими нормативами для водоемов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования (ПДК<sub>в</sub>), а также водоемов рыбохозяйственного значения (ПДК<sub>вр</sub>). 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 Esomg, 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 наносов 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).

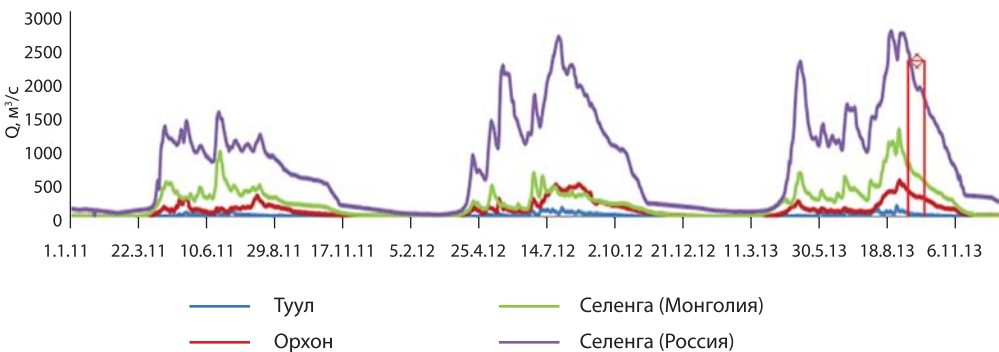
## Водность рек

Среднемноголетний годовой объем стока Селенги с 1930 года по настоящее время равен  $28 \text{ км}^3$ , что составляет около 50% суммарного притока в озеро. 1/3 часть формируется на территории Монголии и 2/3 на территории России. В российской части бассейна наибольшей водностью характеризуется р. Чикой ( $8 \text{ км}^3/\text{год}$ ), другие крупные притоки – Джида, Хилок и Уда – приносят в Селенгу в среднем по  $2\text{--}3 \text{ км}^3$  воды в год. На российско-монгольской границе средний многолетний расход воды равен около  $300 \text{ м}^3/\text{с}$ , что соответствует объему годового стока  $9,46 \text{ км}^3/\text{год}$ . Сток Селенги сильно различается от года к году: максимальный измеренный объем годового стока составляет  $46,4 \text{ км}^3$ , минимальный –  $16,3 \text{ км}^3$ . С 1995 г. длится период маловодья с уменьшением расходов воды в  $2\text{--}3$  раза на реках бассейна Селенги в пределах Монголии и в  $1,5\text{--}2$  раза в пределах Российской Федерации по сравнению с периодом 1983–1995 гг. В качестве непосредственных причин маловодья указывают общее ослабление циркуляции в области конвергенции воздушных масс умеренных широт и восточноазиатского муссона, а также глобальные климатические изменения (Бережных с соавт., 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 ( $2^\circ\text{C}$  для Иркутска), что может быть следствием инерции водных масс Байкала (Шимараев с соавт., 2010).

Для рек бассейна Селенги характерен паводковый режим в связи с ярко выраженным летним максимумом атмосферных осадков. Распределение сто-

ка внутри года крайне неравномерно: 80–90% объема годового стока приходится на теплую часть года, зимой он незначителен или отсутствует вследствие промерзания водотоков. Самые низкие максимальные расходы воды на Селенге в пределах российской части бассейна были зафиксированы в 2007 г., а на притоках минимума, как правило, относятся к 2007, 2011 гг. либо к периоду с 1972 по 1981 г. Наибольшие расходы в верхнем течении Селенги были отмечены в 1993 г., в 1998 был зафиксирован абсолютный максимум на р. Хиллок. Практически ежегодно в течение 1–4 месяцев прекращается сток на реках с площадью водосборов до 40 000 км<sup>2</sup>, при этом в последние десятилетия сток р. Туул в зимнюю межень (с ноября по март) (площадь водосбора около 50 000 км<sup>2</sup>) ниже г. Улан-Батор формируется исключительно за счет сбросов сточных вод с расходов около 5 м<sup>3</sup>/с. Выше участка сброса сточных вод и на расстоянии около 100 км ниже по течению река полностью перемерзает.

Полевые исследования в 2011 и 2013 гг. проводились в период паводка (рис. 2). При этом если летом 2013 гг. осадки в пределах бассейна выпадали относительно равномерно и гидрографы крупных рек были идентичны, то в 2011 г. сильные ливни привели к резкому подъему р. Орхон, особенно заметному на общем фоне снижения паводка на главной реке бассейна. В 2012 г. полевой сезон начинался в меженный период в верховьях, а заканчивался на волне паводка в низовьях Селенги.



**Рис. 2. Расход воды в реках бассейна Селенги в периоды экспедиционных исследований 2011–2013 гг.**

## Транспорт наносов

Значительная часть загрязняющих веществ, мигрирующих с речным стоком, связана с твердофазными взвешенными и влекомыми наносами. К вершине дельты Селенга ежегодно выносит 1,73 млн т взвешенных наносов, что соответствует среднегодовому расходу  $R = 55 \text{ кг/с}$  (1941–2013 гг., разъезд Мо-

стой). В нижнем течении Селенги измеренный темп смещения крупных гряд составляет 1390 м/год, сток влекомых наносов – 0,77 млн т/год, то есть около 45% суммарного стока наносов. Таким образом, суммарный сток взвешенных и влекомых наносов к дельте составляет 2,51 млн т/год, что по крайней мере в 2 раза меньше, чем сток наносов в предшествующий период водности. Среднегодовые значения мутности воды в маловодный период 1996–2015 гг. сократились по сравнению с многоводным периодом 1983–1995 гг. на величину от 3 мг/л в верхней части бассейна до 70 мг/л в нижней (Chalov et al., 2015). Указанные тенденции объясняются сокращением водности рек и уменьшением сельскохозяйственного освоения земель на территории Бурятии в конце XX–начале XXI в.

В верхней части бассейна Селенги широко представлены горностепные ландшафты, поставляющие в реки большой объем твердых частиц при выпадении ливневых осадков. На отдельных участках рек в периоды повышенного стока наблюдается значительное увеличение мутности воды с ее последующим продольным уменьшением. В период межени реки в целом характеризуются продольным увеличением расходов взвешенных наносов, в первую очередь за счет привноса материала от боковых притоков, максимальные расходы отмечаются в створе выше дельты Селенги.

На мутность малых рек в бассейне Селенги сильно влияют урбанизация и горные работы. В пределах г. Улан-Батора 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 за счет сброса сточных вод мутность воды постоянно превышает 300 мг/л (при фоновых значениях для этого сезона менее 10 мг/л). В долине р. Хангалынгол, небольшого притока Орхона, разрабатывается медно-молибденовое месторождение и находится г. Эрдэнэт, сброс производственных и других сточных вод которого приводит к увеличению содержания взвешенных веществ в речной воде в десятки раз. В отдельные сезоны увеличивается мутность рек Эроо, Джида и др.

Количественные параметры потоков взвешенных наносов в бассейне Селенги во многом определяются гидрологическими условиями сезона (рис. 3). В 2011 г. волна паводка отмечалась на реках бассейна в разное время, в связи с чем балансовая модель потоков взвешенных наносов выглядит достаточно хаотично. Низкие расходы воды и ее небольшая мутность обусловили минимальную величину потоков взвеси в монгольской части бассейна в 2012 г.; в российской части потоки резко возрастали в связи с началом половодья и выпадением обильных дождей в низовьях Селенги. Летом 2013 г. паводок наблюдался на всей территории бассейна, поэтому поток взвешенных наносов возрастал вниз по течению постепенно, пропорционально увеличению стока реки.

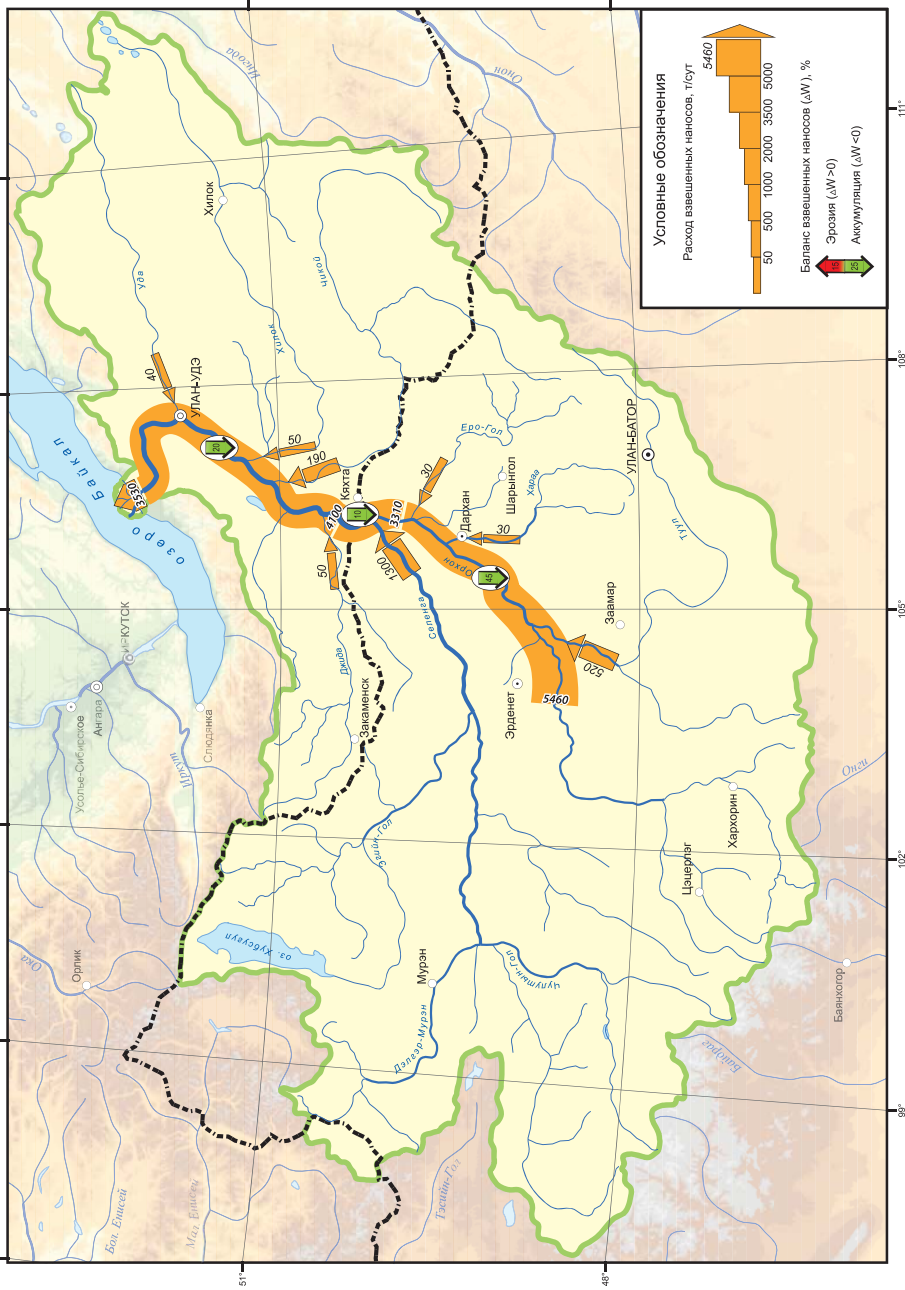
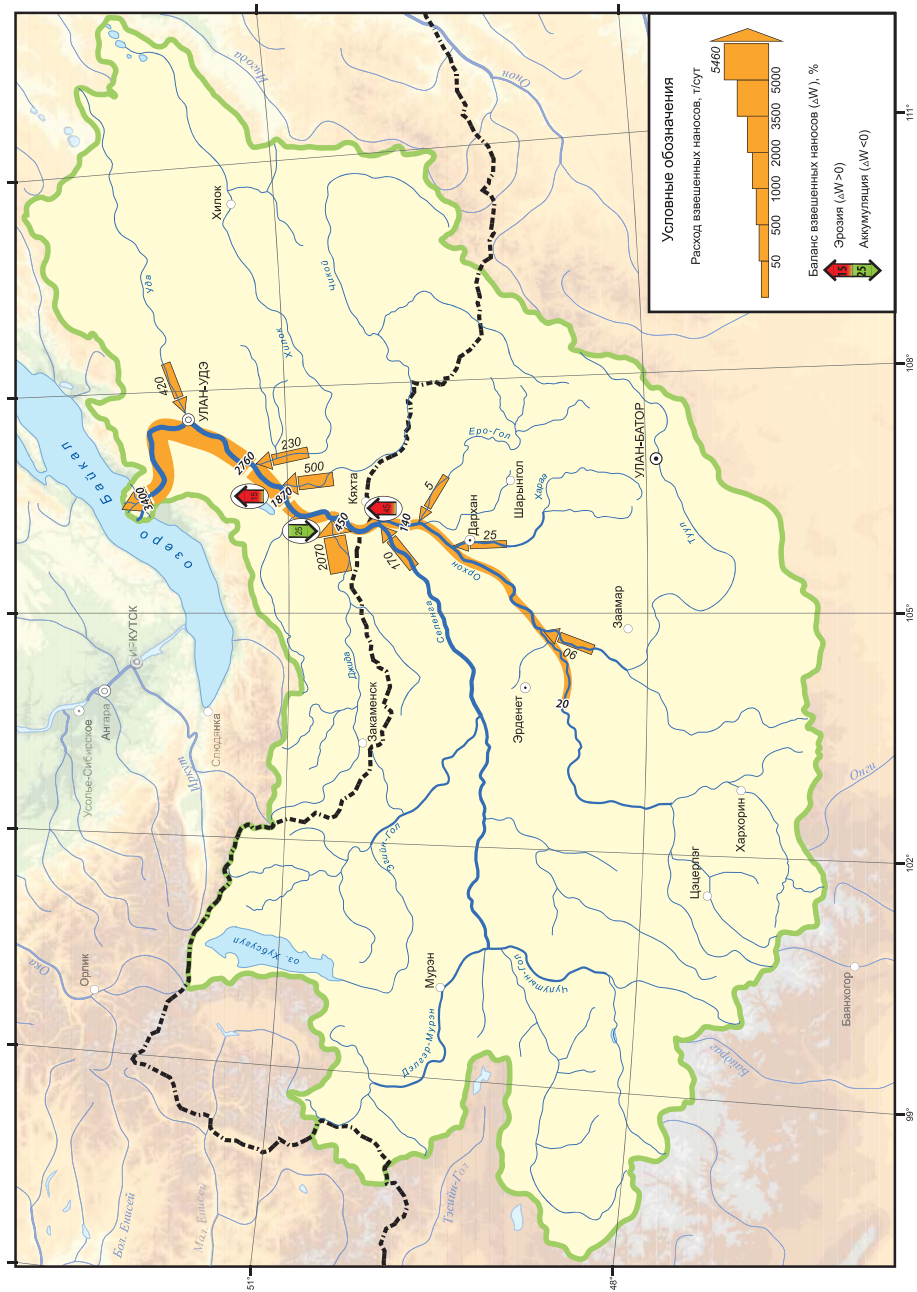


Рис. 3. Потоки взвешенных наносов (т/сут) в бассейне Селенги в периоды экспедиционных исследований 2011 г.



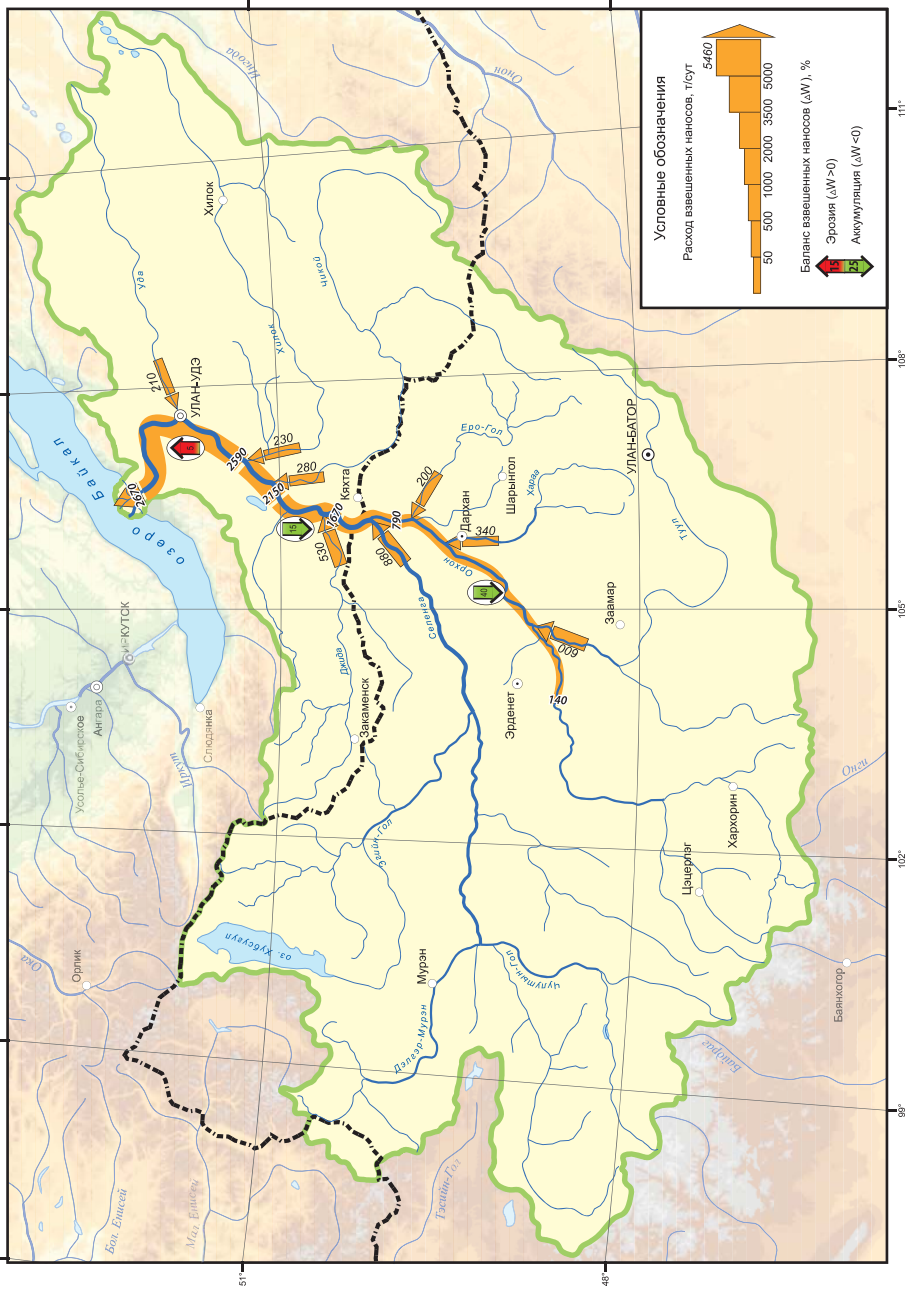


Рис. 3. Потоки взвешенных наносов (т/сут) в бассейне Селенги в периоды экспедиционных исследований 2012–2013 гг.

Природные различия условий формирования стока наносов определяют неоднородность их гранулометрического состава. Частицы размером  $\leq 0,05$  мм имеют, как правило, бассейновое происхождение, более крупные фракции имеют 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  $0,01-0,05$  мм с многократным изменением их крупности в отдельные сезоны года. Средний медианный диаметр взвешенных наносов  $d_{50}$  в 2011–2013 гг. составил  $0,066$  мм. Минимальные значения  $d_{50}$  ( $0,014-0,025$  мм) отмечены в среднем и нижнем течении рек Орхон, Бороо и Туул, максимальные ( $0,485-0,825$  мм) – в верховьях рек Туул, Хаара, Уда.

Во время 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 большой сорбционной способностью и играют значительную роль в переносе загрязняющих веществ.

Содержание органического вещества в составе взвеси варьирует от  $23,6\%$  в паводки до почти полного исчезновения в зимнюю межень (табл. 1). Среднее содержание  $C_{орг}$  в периоды экспедиционных исследований составляло от  $4$  до  $6\%$  (Касимов с соавт., 2016). 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 больше: в р. Желтура –  $10,4\%$ , в р. Джида –  $13,3\%$ , в р. Темник –  $23,6\%$ . Содержание  $C_{орг}$  во взвеси подвержено сезонным изменениям – летом оно больше, а осенью и зимой меньше.

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 с соавт., 2013). На изученных постах общий вклад половодья и паводков в транспорт взвешенных наносов составляет от  $52$  до  $99\%$  их годового стока. Самая высокая доля стока наносов формируется в многоводные годы, наименьшая – в маловодные. Для 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 транспорта наносов позволили количественно оценить геохимические потоки вещества в бассейне Селенги.



Таблица 1

**Расходы воды (Q), ее мутность (S) и содержание органического вещества (C орг) во взвешенных наносах**

Период измерения		Сезон	М/Р*	Q, м <sup>3</sup> /с		S, мг/л			C <sub>орг</sub> , %		
год	даты			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	–	–	–

\*М – монгольская, Р – российская части бассейна.

\*\*В скобках – без учета р. Туул ниже Улан-Батора.

Примечание. Прочерк – показатель не определяли.

### 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), уменьшаясь до 100–150 мг/л вниз по течению по мере разбавления водами притоков (реки Джиды, Темник, Чикой, Хилок, Уда и др.). Для малых рек, дренирующих засоленные породы (Киран), либо подверженных техногенному воздействию (Модонкуль, Хангалынгол) характерна большая минерализация воды (>300 мг/л). Речные воды имеют гидрокарбонатно-кальциевый состав, нейтральную и слабощелочную реакцию среды (рН 7,0–8,0), на отдель-

ных участках – щелочную (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 С орг нередко отмечается в Селенге у пос. Наушки, вниз по течению оно уменьшается за счет разбавления водами крупных притоков. Ниже г. Улан-Удэ из-за сброса городских сточных вод содержание органических веществ, особенно легкогидролизуемых, в Селенге снова возрастает (Башенхаева с соавт., 2006).

*Первая ассоциация.* 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 в паводок 2011 г. и межень 2012 г. на порядок превысило среднемировое (табл. 2). Они образуют первую ассоциацию элементов, слабоподвижных в нейтральной и щелочной среде, но способных образовывать растворимые комплексные соединения с органическим веществом (Крайнов с соавт., 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 Сорг и растворенных форм металлов этой ассоциации существенно превышало таковое 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 больше, 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 с соавт., 2012). В этом же направлении возрастает содержание Fe – от 200–500 мкг/л в среднем и нижнем течении реки до 500–1000 (иногда до 1500–2000 мкг/л) в водотоках дельты, что может быть связано с преимущественным нахождением Fe в форме металлоорганических соединений, а также с усиленной его мобилизацией в переувлажненных глеевых почвах и отложениях в летний период. В непосредственной близости от основных очагов городского и горнопромышленного загрязнения (гг. Улан-Удэ, Эрдэнэт, Заамар) концентрация Fe возрастает до 2000–5000 мкг/л.

Содержание растворенных форм металлов резко увеличивается на волне паводков. Так, 29–30 июля 2011 г. на р. Орхон в районе Хархорина после силь-

ных 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 уменьшилось до обычных значений.

Таблица 2

**Среднее содержание растворенных форм химических элементов  
в речных водах бассейна Селенги**

ТММ	Паводок, 2011 г. (74)*		Межень, 2012 г. (98)*		Спад паводка, 2013 г. (92)*		Реки мира**, мкг/л
	мкг/л	$K_c$	мкг/л	$K_c$	мкг/л	$K_c$	
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

\*Данные авторов, в скобках – число проб

\*\*Среднее содержание в реках мира (Gaillardet et al., 2004)

Примечание.  $K_c$  – коэффициент концентрации относительно среднего содержания в реках мира

Вторая ассоциация включает наиболее подвижные в речных водах бассейна Селенги элементы с преобладанием ионной формы 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 больше него, то концентрация Sr, Li, Mo, As и U устойчиво вне зависимости от сезона и превышает среднемировые значения (табл. 2). Это связано с региональной геохимической специализацией бассейна, щелочной реакцией речных вод, а также с засушливостью его монгольской части, для степных районов которой характерен повышенный фон легкоподвижных элементов. Так, в реках монгольской части бассейна содержание Br достигает 400–500, В – 50–70 мкг/л, 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 больше 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. Он 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 больше среднемирового) и близко к его концентрации в оз. Байкал (1,3 мкг/л) (Чебыкин с соавт., 2012). В низовьях рек Туул, Орхон, Бороо и Хараа оно увеличивается до 2–5 мкг/л, а максимальных значений достигает в малых реках районов 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 больше среднемирового. В российской части бассейна содержание As обычно составляет <2 мкг/л, в монгольской части оно повышено, особенно в районах добычи бурого угля, 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<sub>г</sub> (10 мкг/л), а на отдельных участках рек Туул и Бороо превышает норматив, достигая 12–15 мкг/л. 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 реки Модонкуль на 1–2 порядка больше фоновых значений. Концентрация этих металлов в р. Джида в месте впадения р. Модонкуль (точка S311, рис. 4) в 5–10 раз больше, чем выше по течению (точки S309 и S310), однако загрязнение быстро уменьшается вниз по течению Джида за счет разбавления воды.

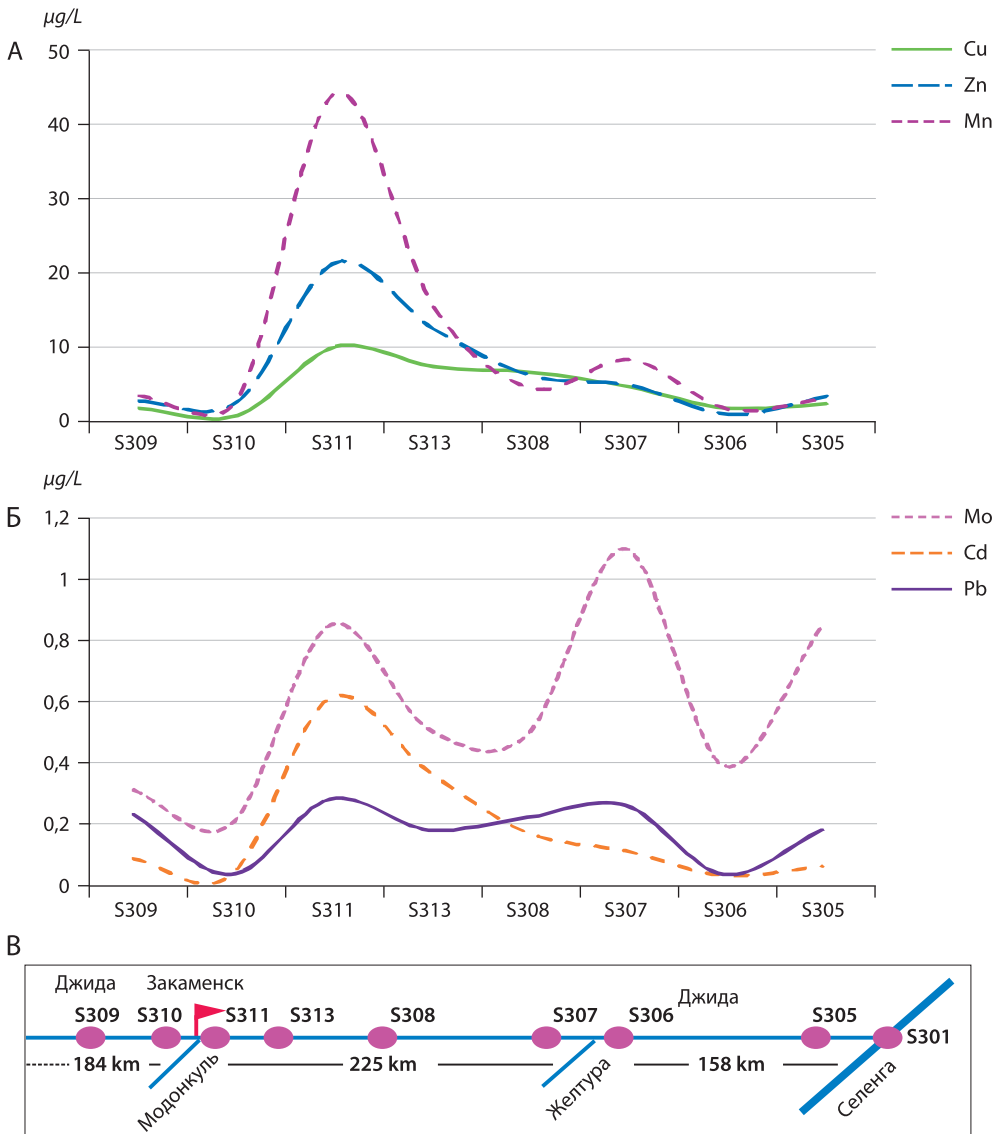


Рис. 4. Растворенные формы ТММ в воде р. Джида (2013) от верховий (S310) через устье р. Модонкуль (S311) к слиянию с Селенгой (S305)

А, Б, В – расшифровка в тексте

## Тяжелые металлы и металлоиды 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 наносах Селенги и ее притоков по данным трех полевых сезонов приведено в табл. 3.

Таблица 3

### Среднее содержание ТМ во взвешенных наносах (мг/кг)

ТММ	Бассейн Селенги			Среднее содержание в реках мира*	Кларки**		
	паводок 2011 г.	межень 2012 г.	спад паводка 2013 г.		а	б	в
Fe	49826	40235	41905	50300	30890	39180	–
Al	65277	35451	42377	86300	77440	81500	–
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

\*Среднее содержание во взвешенном веществе рек мира (Савенко, 2006)

\*\*Среднее содержание в верхней части континентальной земной коры: а – Wedepohl, 1995; б – Rudnick, Gao, 2003; в – Hu, Gao, 2003

В межень содержание ТММ, как правило, наименьшее. В этот период взвешенные наносы Селенги обогащены относительно верхней части континентальной земной коры по  $As_{7,5}$ , Mn, Cu,  $Cd_{2-3}$  (индексы – кларки концентрации КК) (Wedepohl, 1995). При использовании величин кларков (Rudnick, Gao, 2003;

Hu, Gao, 2008) состав ассоциации выглядит несколько иначе:  $Cd_{3,5'}$ , As, Mo,  $Mn_{2-3}$ . В паводок содержание многих ТММ значительно возрастает, до следующих кларков концентрации:  $As_{16'}$ ,  $Cd_{10'}$ , Mn, Cu,  $Zn_{4-5'}$ , Pb, Ni, Co,  $V_{2-3'}$ , по (Wedepohl, 1995), и  $Cd_{16'}$ ,  $As_6'$ ,  $Mo_{4'}$ , Mn, Cu, Zn, Co,  $Pb_{2-3'}$ , по (Rudnick, Gao, 2003; Hu, Gao, 2008).

Среднее содержание ТММ во взвешенных наносах рек мира, как правило, больше 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 меньше.

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 р. Баргузин (12 мг/кг) (Бобров с соавт., 2000). Максимальное содержание As во взвеси Селенги установлено в районе пос. Наушки на границе России и Монголии – 23 мг/кг, что связано с высоким региональным фоном As в почвах и отложениях монгольской части бассейна. В нижележащих 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 с взвесью их притоков – рек Киран и Модонкуль, соответственно, взвешенные наносы которых обогащены As. Однако это мало отражается на содержании As во взвеси самой Селенги из-за его частичного осаждения в донных отложениях и перемешивания с наносами с низким содержанием этого металлоида.

Высокие значения КК Cd обусловлены главным образом техногенным загрязнением, что особенно сильно проявляется на р. Модонкуль и нижележащем участке р. Джиды, где содержание Cd во взвешенных наносах  $>20$  мг/кг, то есть 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 Zc (рис. 5) в российской части бассейна, как правило, меньше 32, что в целом свидетельствует о низком уровне загрязнения.

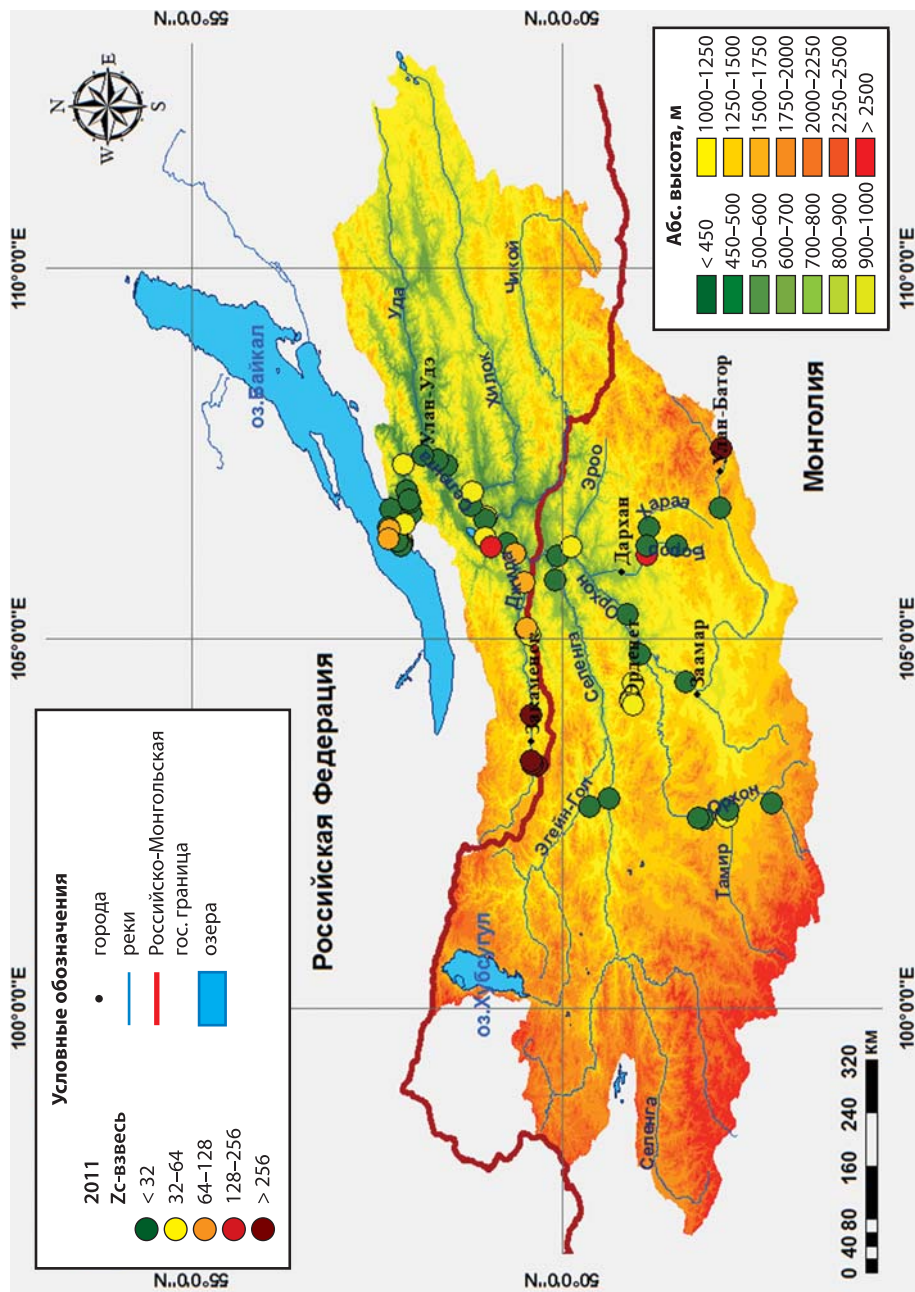


Рис. 5. Суммарный показатель загрязнения взвешенных наносов (паводок, июль-август 2011 г.)



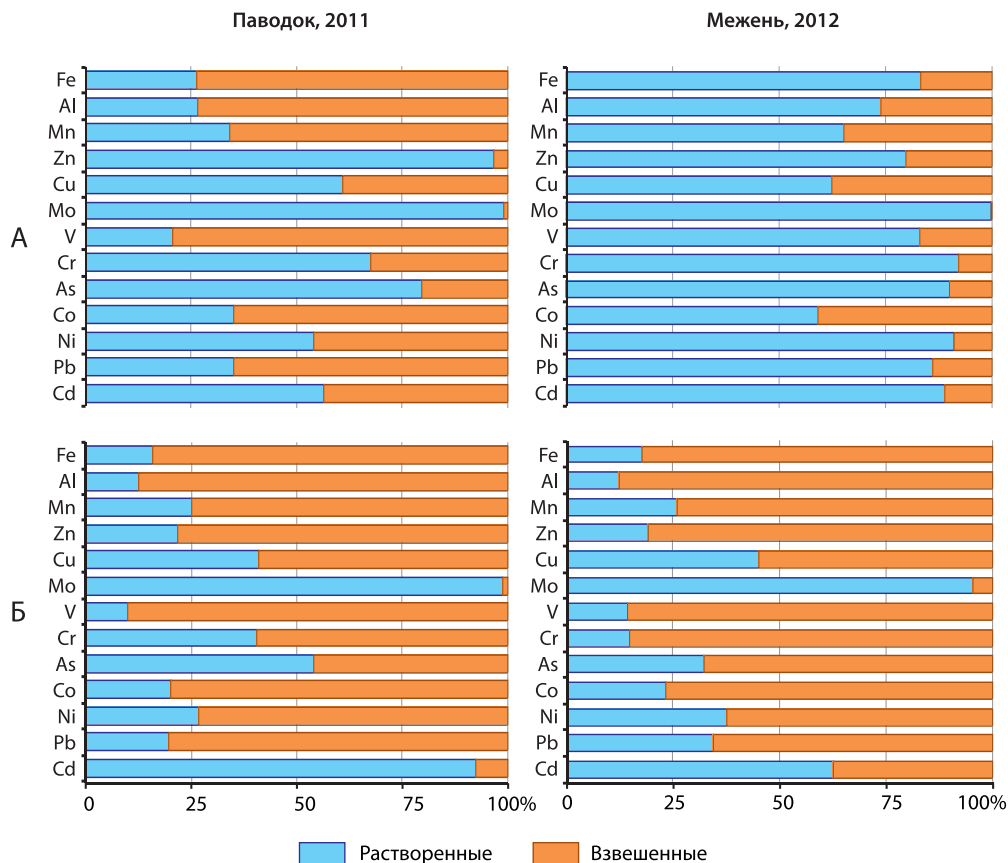
Близкие величины  $Z_c$  характерны для большинства рек монгольской части бассейна, однако в ряде случаев этот показатель возрастает до 32–64 и даже до 64–128, что соответствует умеренному и высокому уровням загрязнения. Максимальные значения  $Z_c$ , превышающие 128, отмечены вблизи главных источников 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 росту концентрации многих химических элементов, а также увеличению их подвижности, что проявляется в увеличении содержания непрочносорбированных форм, связанных с аморфными гидроксидами железа, и 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 общего речного транспорта 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 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 меньше 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. 6). Из-за очень низкой 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%.



**Рис. 6. 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

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. 6) 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 уменьшилась до 20–30%.

Влияние паводков, формирующихся в верхней части бассейна, на формы миграции ТММ уменьшается вниз по течению, поэтому в дельте Селенги соотношение растворенных и взвешенных форм ТММ в течение года изменяется слабо. Это связано с перераспределением стока по дельтовым протокам, уменьшением гидродинамической активности потока и осаждением значи-

тельной части взвешенных наносов. В паводок и межень доля растворенных форм Mo и Cd доходила до  $\geq 90\%$ , As, Cu и Ni – 30–50%, остальных элементов –  $< 30\%$  (за исключением Cr и Pb).

## Потоки тяжелых металлов и металлоидов в бассейне Селенги

Для пространственной характеристики транспорта 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. 7) в период паводка, обусловленного сильными дождями в верхней части бассейна в июле-августе 2011 г.

Кадмий – один из наиболее токсичных тяжелых металлов, 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 50–70% от общего содержания, что существенно больше, 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 40–60%.

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. 7). 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 сокращался в связи с осаждением 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, составив у границы 0,46 кг/сут. В российской части бассейна наибольшее влияние на поток Cd оказала р. Джида, после слияния с которой он увеличился до 2–3 кг/сут. В нижней части бассейна нет крупных источников Cd, воды Селенги разбавляются водами притоков и он частично осаждается в донных отложениях, поэтому в дельту Селенги поступает около 1 кг/сут растворенного и взвешенного Cd.

Поток взвешенной меди в верховьях Орхона тоже значительно (почти в 10 раз) превышал поток растворенной формы: 366 и 39 кг/сут. соответственно.

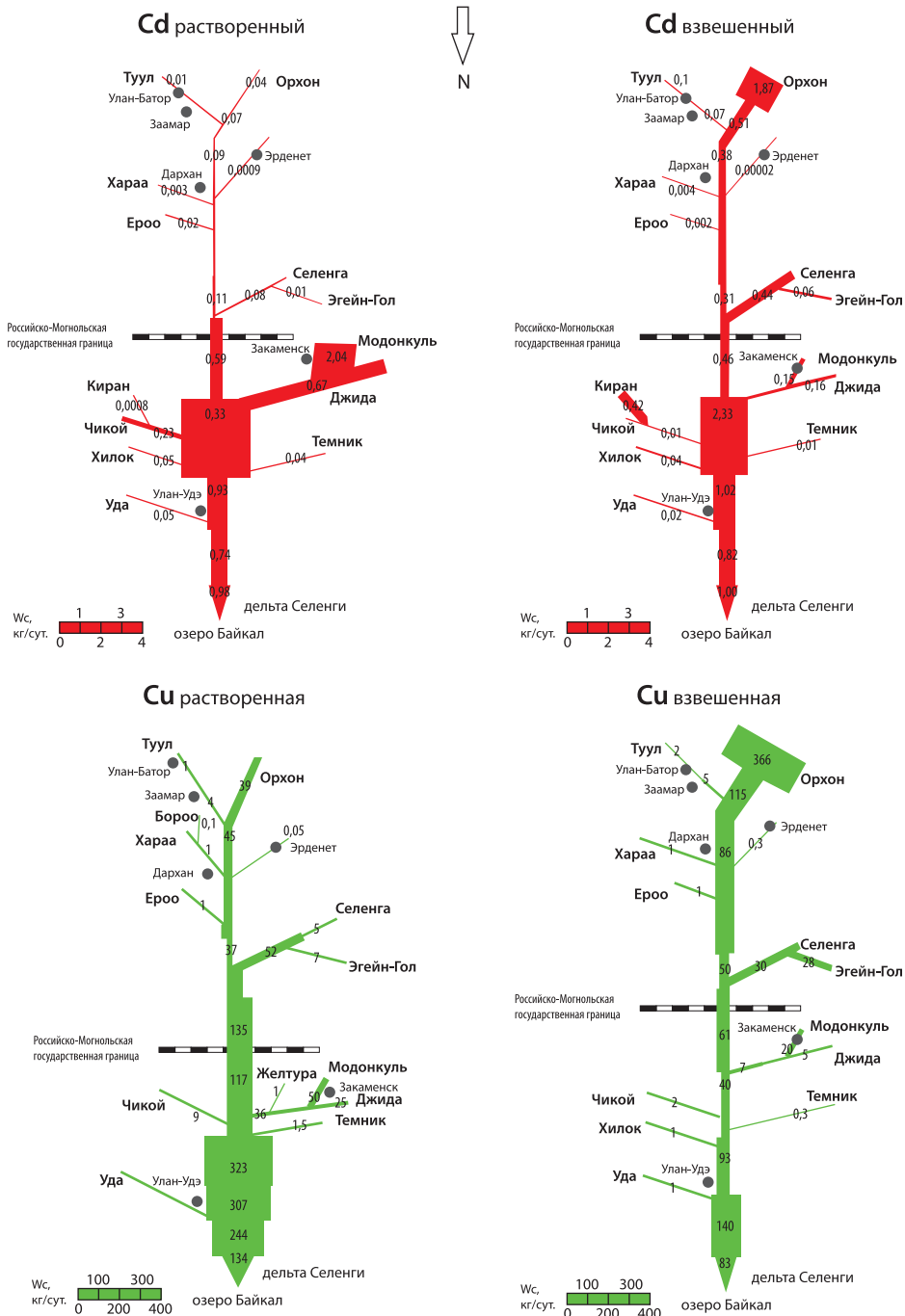


Рис. 7. Геохимические потоки Cd и Cu (кг/сут) в период летнего паводка, июль 2011 г.

На границе России и Монголии поток взвешенной формы  $\text{Cu}$  уменьшился 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.  $\text{Cu}$ , причем ~ 50% этого количества достигло оз. Байкал. На поток взвешенной  $\text{Cu}$  наибольшее влияние оказали г. Улан-Удэ и р. Уда, ниже слияния с которой поток  $\text{Cu}$  возрос с 93 до 140 кг/сут.

Значительным своеобразием характеризуются потоки  $\text{Mo}$  (рис. 8), мигрирующего в щелочной среде главным образом в растворенной форме.

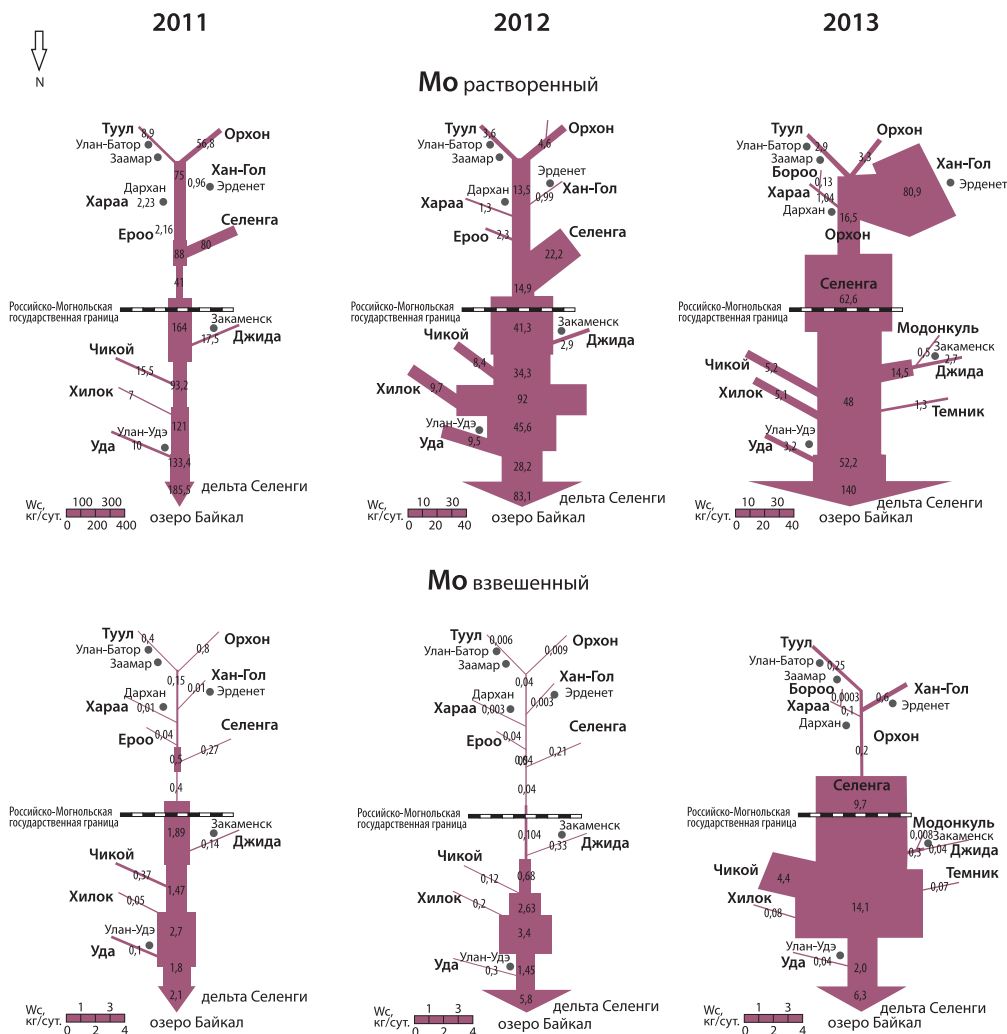


Рис. 8. Геохимические потоки  $\text{Mo}$  (кг/сут) в 2011–2013 гг.

Как уже отмечалось, месторождения этого элемента имеются как в монгольской, так и в российской части бассейна. Наибольший поток растворенного Мо отмечался в паводок 2011 г.: в верхней части бассейна до 90 кг/сут, в нижней – до 180 кг/сут. Вероятно, это связано с интенсивным выщелачиванием Мо из почв при выпадении ливневых осадков. В межень 2012 г. поток Мо в верхней части бассейна минимален (10–20 кг/сут), в средней части в основном 20–40 кг/сут, в дельте – более 80 кг/сут. Потоки взвешенного Мо намного меньше: в монгольской части они, как правило, не превышают 1 кг/сут, а в российской местами возрастают до 10–15 кг/сут. Если в формирование потоков растворенного Мо существенный вклад вносит монгольская часть бассейна, то потоки взвешенного Мо формируются почти исключительно на территории России. Среди притоков Селенги наибольшей поставкой Мо выделяются рр. Чикой и Джиды, что обусловлено металлогенической специализацией их водосборов.

Таким образом, геохимические потоки растворенных форм Cd, Cu и Mo в целом увеличиваются вниз по течению к дельте Селенги, что связано в основном с возрастанием водности реки. Для потоков взвешенных форм в паводок в верхней части бассейна отмечены экстремально высокие значения, обусловленные выпадением ливневых осадков; они быстро уменьшаются вниз по течению в связи с осаждением наносов при сокращении расходов воды. В нижнем течении Селенги потоки снова возрастают из-за впадения крупных притоков. Техногенное воздействие сильнее всего проявляется в существенном увеличении потоков взвешенного и растворенного Cd ниже впадения Джиды. Влияние г. Улан-Удэ на потоки ТММ проявляется во все сезоны. Для Mo, 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. Потоки ТММ возрастают вниз по течению до дельты Селенги, в верхней части которой они уменьшаются в связи с частичным осаждением взвешенных наносов.

## Выводы

1. 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 методической основой оценки современного состояния водных объектов и переноса поллютантов в системе Селенга–Байкал.

2. Количественные параметры транспорта 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 павод-

ков в транспорт 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.

3. 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.

4. В верхней части бассейна в речных водах преобладают взвешенные формы большинства ТММ, в средней и нижней частях – растворенные формы. Доля взвешенных форм миграции резко возрастает при прохождении паводков, особенно в верховьях рек; в нижней части бассейна влияние паводков на соотношение форм уменьшается, особенно в дельте Селенги.

5. 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 из-за впадения 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. Джида вплоть до ее впадения в Селенгу.

*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).*

*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., Сороковицова 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: Материалы 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., Богданова М.Д., Рябова Н.В., Лычагин М.Ю.* 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.

*Касимов Н.С., Лычагин М.Ю., Чалов С.Р., Шинкарева Г.Л., Пашкина М.П., Романченко А.О., Промахова Е.В.* Бассейновый анализ потоков вещества в системе Селенга-Байкал // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2016. № 3. С. 67–81.

*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.: Астрейя-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., Сороковикова Л.М., Томберг И.В., Воднева Е.Н., Рассказов С.В., Ходжер Т.В., Грачев М.А. Современное состояние вод р. Селенги на территории России по главным компонентам и следовым элементам // Химия в интересах устойчивого развития. 2012. № 5. С. 613–631.

Шумараев 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. V. 19. P. 769–786.

Chalov S.R., Jarsjö J., Kasimov N., Romanchenko A.O., Pietróń J., Thorslund J., Promakhova E.V. Spatio-temporal variation of sediment transport in the Selenga River Basin, Mongolia and Russia // Environm. Earth Sci., 2015. V. 73. Iss. 2. P. 663–680.

Chalov S.R., Kasimov N., Lychagin M., Alexeevsky N., Belozeroва E., Theuring P., Shinkareva G., Romanchenko A., Garmaev E. Water resources assessment of the Selenga–Baikal river system // Geoöko. 2013. V. XXXIV. P. 77–102.

Gaillardet J., Viers J., Dupre B. Trace elements in river waters // Treatise on Geochemistry / Ed. by H.D. Holland, K.K. Turekian. Amsterdam: Elsevier, 2004. V. 5. 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. V. 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. V. 400. P. 290–314.

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

Inam E., Khantotong S., Kim K.W., Tumendemberel B., Erdenetsetseg S., Puntsag T. Geochemical distribution of trace element concentrations in the vicinity of Boroo gold mine, Selenge Province, Mongolia // Environm. Geochem. and Health. 2011. V. 33. P. 57–69.

Karthe D., Kasimov N., Chalov S., Shinkareva G., Malsy M., Menzel L., Theuring P., Hartwig M., Schweitzer C., Hofmann J., Priess J., Lychagin M. Integrating multi-scale data for the assessment of water availability and quality in the Kharaa–Orkhon–Selenga river system // Geography, Environment, Sustainability. 2014. V. 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 Research. 2015. V. 31. P. 859–868.

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

Olefelt 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. V. 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. V. 285. P. 15–31.

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

*Thorslund J., Jarsjö J., Chalov S.R., Belozerova 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. V. 14. P. 2780–2792.

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