

УДК 556.5.06

DOI: 10.21782/GIPR0206-1619-2016-5(39-48)

**С. Р. ЧАЛОВ, М. Г. ГРЕЧУШНИКОВА, М. И. ВАРЕНЦОВ, Н. С. КАСИМОВ**

Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова,  
119991, Москва, Ленинские горы, 1, Россия, srchalov@geogr.msu.ru, allavis@mail.ru,  
mvar91@gmail.com, secretary@geogr.msu.ru

## СОВРЕМЕННАЯ И ПРОГНОЗНАЯ ОЦЕНКА СТОКА ВОДЫ И НАНОСОВ РЕК БАССЕЙНА СЕЛЕНГИ

*Предложена интегральная схема оценки стока воды и наносов рек бассейна р. Селенги с использованием экспедиционных, сетевых и модельных данных. Приведены оценки и установлены закономерности изменений стока воды, взвешенных и влекомых наносов реки. Выполнен прогноз региональных изменений стока воды в связи с антропогенным освоением территории. Показано, что ожидаемое регулирование стока Селенги и ее притоков в Монголии приведет к сокращению максимального среднемесячного стока до 14–15 % и увеличению минимального зимнего стока до 73–75 %. Потери стока на испарение с проектируемых водохранилищ и водозабор на переброску стока будут соответствовать снижению уровня воды в Байкале до 1 см/год. На основе региональной мезоклиматической модели COSMO\_CLM исследована возможная трансформация водного баланса территории в результате антропогенного изменения ландшафтов при добыче полезных ископаемых.*

Ключевые слова: Байкал, водохранилище, интегральная оценка, антропогенное освоение территории, регулирование стока, трансграничные воды.

**S. R. CHALOV, M. G. GRECHUSHNIKOVA, M. I. VARENTSOV, AND N. S. KASIMOV**

Lomonosov Moscow State University, 119991, Moscow, Leninskie Gory, GSP-1,  
Russia, srchalov@geogr.msu.ru, allavis@mail.ru, mvar91@gmail.com, secretary@geogr.msu.ru

## CURRENT AND PREDICTIVE ASSESSMENT OF WATER AND SEDIMENT DISCHARGE OF THE SELENGA RIVER

*We suggest an integral scheme for assessing the water and sediment discharge in the rivers of the Selenga river basin, based on using expeditionary, network and model data. Assessments are made of the changes in streamflow and in suspended and tractional sediments of the river, and relevant regularities are revealed. A forecast is made of regional changes in water discharge due to anthropogenic development of the territory. It is shown that the expected flow regulation of the Selenga and its tributaries in Mongolia would lead to a reduction in the maximum mean monthly streamflow by up to 14–15 %, and to an increase in the minimum winter flow by up to 73–75 %. Evaporation losses of the discharge from the projected reservoirs, and the water intake for the flow transfer will correspond to a decrease in the water level in Baikal by as much as 1 cm/year. The possible transformation of the territory's water balance as a result of anthropogenic changes in landscapes during mining operations is investigated in terms of the regional mesoclimate model COSMO\_CLM.*

Keywords: Baikal, reservoir, integral assessment, anthropogenic development of territory, flow regulation, transboundary waters.

## ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Озеро Байкал — водный объект, внесенный в Список мирового природного наследия ЮНЕСКО в 1996 г. Первостепенное значение имеют изучение и прогноз изменений внешнего и внутреннего водообмена, последствия которых выражаются в изменении уровня режима, запаса воды, размыве берегов, состоянии гидробионтов. Водосбор озера расположен на территории Российской Федерации и Монгольской Народной Республики, наиболее водоносный приток Байкала — р. Селенга — представляет собой трансграничный водный объект. Международное сотрудничество и открытый обмен данными, совместная оценка последствий антропогенных преобразований лежат в основе экологического благополучия оз. Байкал.

Последние оценки водного баланса выполнены для оз. Байкал в работе [1], а для бассейна Селенги — в работе [2]. При наличии относительно большого числа работ, посвященных оценкам качества воды в бассейне р. Селенги [3–8], до настоящего времени имелись лишь отдельные сведения

о временной динамике стока наносов и качества воды [9]. Изменение качества воды в Селенге большинство исследователей связывало с антропогенной деятельностью [7], в том числе динамикой землепользования [10], либо с климатическими изменениями [8]. Прогнозных оценок стока воды и наносов в регионе не проводилось.

Актуальность оценки современного речного стока и его возможных изменений для региона исключительно возросла в связи с анонсированием в Монголии «Проекта поддержки инфраструктуры для горнодобывающей отрасли». Предполагается строительство нескольких водохранилищ на Селенге и ее притоках (рис. 1): Шурэн на р. Селенге, Орхон на ее правом притоке р. Орхон, Чаргайт на р. Дэлгер-Мурэн и Эгийн на ее левом притоке р. Эгийн-Гол [11]. В середине января 2016 г. «Агентство социальной информации» (АСИ) сообщило, что монгольская сторона опубликовала техническое задание на разработку оценки воздействия на окружающую среду (ОВОС) и региональной экологической оценки проекта ГЭС Шурэн. Согласно справке международной экологической коалиции «Реки без границ», по проектируемым в Монголии плотинам в бассейне Селенги в феврале 2015 г. объявлен тендер по техническому заданию на технико-экономическое обоснование (ТЭО) строительства ГЭС Шурэн и Орхон-Гоби. Завершено ТЭО по проектам ГЭС Орхон и Дэлгер-Мурэн [12]. На официальном сайте проекта на р. Эгийн-Гол указано, что подписано генеральное кредитное соглашение между Правительством Монголии и экспортно-импортным банком КНР (зарубежный инвестор) для выдачи кредита на 1 млрд долл. [13].

Ограниченность гидрометрических наблюдений за характеристиками речного стока (средняя плотность гидрометрических постов на российской территории — 1 пост на 3750 км<sup>2</sup>, а на монгольской — почти в четыре раза меньше (1 пост на 16 500 км<sup>2</sup>)) определяет необходимость разработки

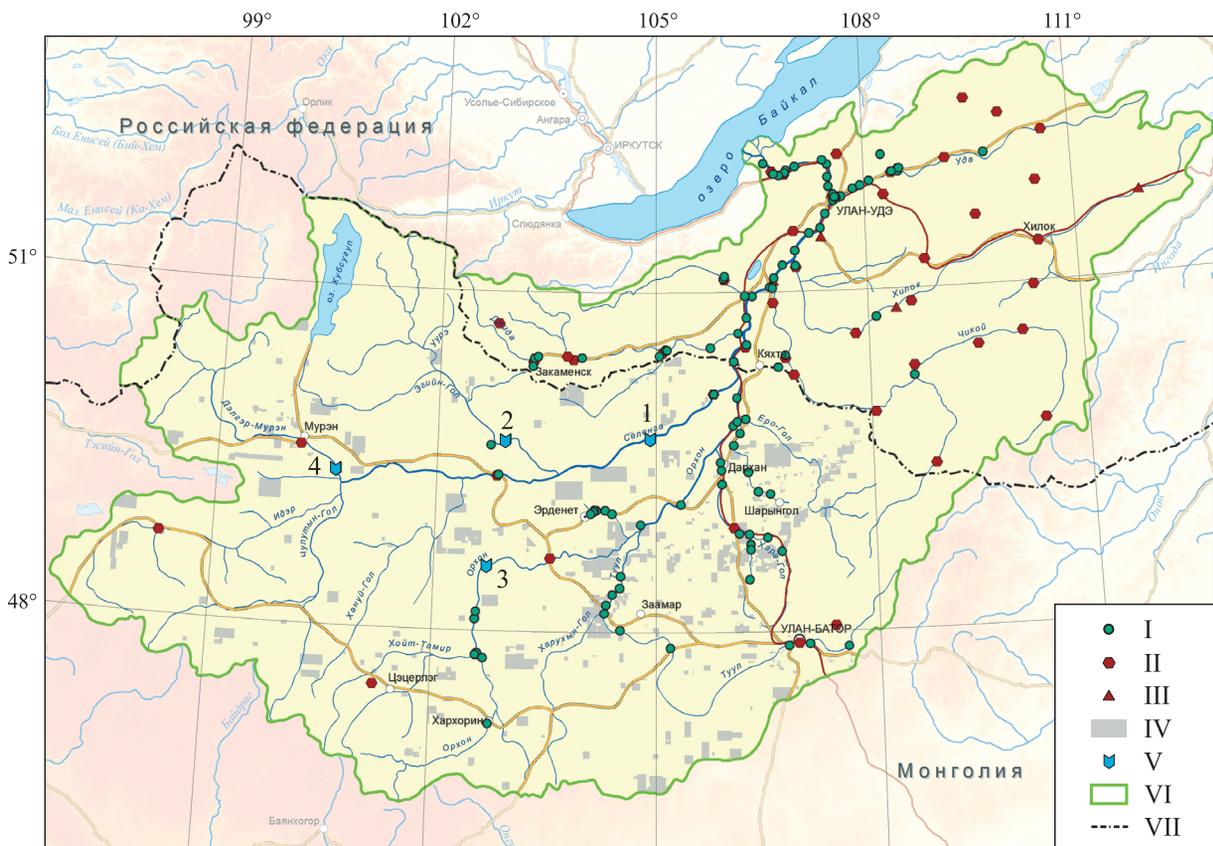


Рис. 1. Схема бассейна р. Селенги.

I — створы полевого мониторинга МГУ в 2011–2015 гг.; II — гидрометрические посты; III — гидрометрические посты, осуществляющие контроль за характеристиками стока наносов; IV — лицензионные области месторождений полезных ископаемых в Монголии, по [25]; V — проектируемые створы ГЭС в Монголии (1 — Шурэн, 2 — Эгийн, 3 — Орхон, 4 — Чаргайт на р. Дэлгер-Мурэн). Границы: VI — бассейна Селенги, VII — государственная граница Российской Федерации.

интегрального подхода к прогнозированию стока воды и наносов, совмещающего данные экспедиционных и сетевых наблюдений с численными подходами.

Цель данной статьи — обобщение доступной информации о стоке воды и наносов р. Селенги, разработка методологии прогноза стока воды и наносов и выполнение прогнозных оценок водного стока при учете ожидаемых антропогенных воздействий. В частности, решаются следующие задачи: разработка методологии интегральной оценки стока воды и наносов р. Селенги; актуальная оценка водного баланса бассейна реки в современных климатических условиях, а также баланса наносов Селенги в современных климатических условиях; прогнозная оценка водного стока р. Селенги в связи с планируемым гидротехническим строительством в Монголии.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В основу работы легла интеграция полевых и численных методов (рис. 2) для разных пространственных уровней бассейна Селенги. Использовалась информация по 41 метеорологической станции в бассейне реки за период 1995–2013 гг. Многолетние тенденции изменения стока наносов оценивались по рядам мутности воды, измеряемой на семи постах в бассейне Селенги (см. рис. 1).

Информация, характеризующая сток воды, наносов и химических элементов, собрана в ходе экспедиционных работ МГУ в июле–августе 2011 г., июне 2012 г., августе и сентябре 2013 г., августе 2014 г. и марте 2015 г. на более чем 100 створах в пределах Монголии (реки Селенга, Орхон, Хангол, Тула, Хара, Эроо, Эг) и России (реки Селенга, Уда, Джида, Темник, Чикой, Хилок, Оронгой, Итанца, Киран, Кидара, Желтура, Удунга, Сухара, Тугнуй, Менза, Буй, Брянка, Илка, Челутай Курба, Кодун, Кижинга, Она) (см. рис. 1).

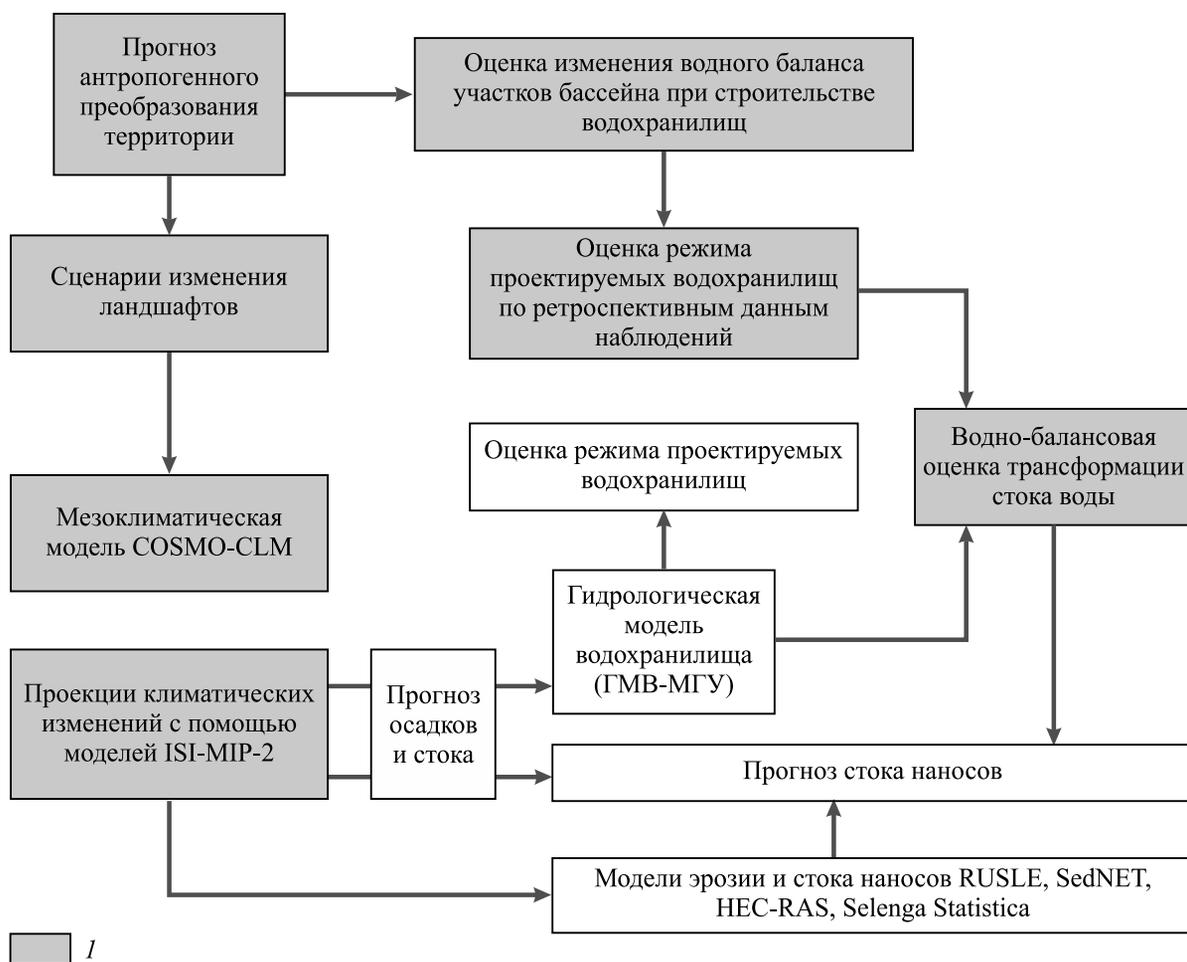


Рис. 2. Концептуальная схема прогнозной оценки стока воды и наносов р. Селенги.

1 — блоки оценки, представленные в данной работе.

В систему разработанных численных средств оценки стока воды и наносов (см. рис. 2) вошли детерминированная модель формирования стока с полураспределенными параметрами Ecomag, модель эрозионного потенциала RUSLE и региональная климатическая модель COSMO-CLM [14]. Перенос вещества в пределах русловых систем исследовался на основе обобщения сетевых и экспедиционных данных, интегрированных с моделью смыва и баланса наносов SedNET [15] и одномерной гидродинамической моделью 250-километрового участка р. Туул-Орхон HEC-RAS [16]. Регрессионная модель стока и состава взвешенных наносов Selenga Statistica совместила характеристики частных водосборов и параметры стока взвешенных наносов (мутность, расходы взвешенных наносов, крупность и химический состав переносимого материала), оцениваемых по данным мониторинга МГУ 2011–2015 гг. В качестве предикторов использованы гидрологические, ландшафтные и геолого-геоморфологические характеристики более 60 частных водосборов, а также параметры хозяйственной деятельности в них, которые сопоставлялись с сезонными значениями мутности, расхода взвешенных наносов, характеристик гранулометрического состава. В качестве меры зависимости между переменными используется коэффициент корреляции

$$r_{xy} = C(x, y) / \sigma_x \sigma_y,$$

где  $r_{xy}$  — коэффициент корреляции между двумя величинами;  $C(x, y)$  — величина ковариации, определяющаяся как  $C(x, y) = M(x - mx)(y - my)$ ;  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$  — среднеквадратические отклонения, равные квадратному корню из дисперсии заданных величин. Для каждого сезона выбирались параметры с  $r_{xy} > 0,7$ , которые использовались далее для построения уравнений множественной регрессии.

В разном сочетании со сценариями изменений климата (на основе ISI-MIP-2) и возможными вариантами развития хозяйственной деятельности указанные модельные подходы дают возможность проведения прогнозных оценок речного стока (см. рис. 2). В настоящей работе прогнозные оценки выполнены исключительно на примере водного стока. Для расчета его трансформации при строительстве гидроузлов применялся водно-балансовый метод, основанный на адаптации среднемесячных расходов воды притока и сброса при учете полезной емкости и контроле переполнения [11]. В дальнейшем учет морфометрических характеристик водохранилищ и пропускной способности гидроузлов с использованием гидрометеорологической информации среднесуточного временного масштаба позволяет приступить к разработке математической модели ГМВ-МГУ [17], адаптированной для проектируемых водохранилищ в Монголии. Региональная климатическая модель COSMO-CLM использована для прогноза трансформации водного баланса территории (осадков) при учете деградации ландшафтов в процессе горнодобывающей деятельности.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

**Современная оценка характеристик речного стока.** Ежегодный объем водного стока р. Селенги в среднем за многолетний период составляет более 50 % суммарного притока речных вод в оз. Байкал и в 3,5 раза превышает сток второй по водоносности реки байкальского водосбора — Верхней Ангары [18]. В настоящее время отмечается период пониженной водности, наиболее вероятной причиной которого называется ослабление циркуляции в зоне конвергенции муссонных потоков и потоков умеренных широт над Монголией и Северным Китаем [19]. Осредненные данные за 1995–2013 гг. по 41 метеорологической станции в бассейне Селенги показывают снижение годовой суммы осадков на 2,7 мм, что соответствует уменьшению суммы осадков на 0,15 мм/год. В этих условиях, по сравнению с прежними оценками [1, 2, 20], наблюдается резкое уменьшение изменчивости стока, а также его средних значений примерно с середины 1990-х гг. Изменения водности коснулись многоводных сезонов, расходы воды маловодных сезонов остались практически без изменения. Увеличение минимальных и снижение максимальных расходов [21] определяется общей тенденцией к увеличению температуры воздуха (в среднем в бассейне на 1,6 °C за 1938–2009 гг., или 0,022 °C/год), сопровождающемуся таянием вечной мерзлоты.

Устойчивый период понижения среднегодовой водности р. Селенги в нижнем течении (гидропост Мостовой) пришел на смену периода роста водности (рис. 3). При этом минимальный годовой сток до середины 1990-х гг. имел выраженную тенденцию к росту (см. рис. 3, а). С начала 2000-х гг. минимальные в году расходы воды также начали проявлять тенденцию к снижению, что свидетельствует об общем уменьшении водообеспеченности в бассейне и возможном увеличении безвозвратного водопотребления в Монголии (см. рис. 3, б). Уменьшение стока с середины 1990-х гг. произошло и в российской части бассейна Селенги, хотя выражено оно меньше по сравнению с монгольской частью (см. рис. 3, в).

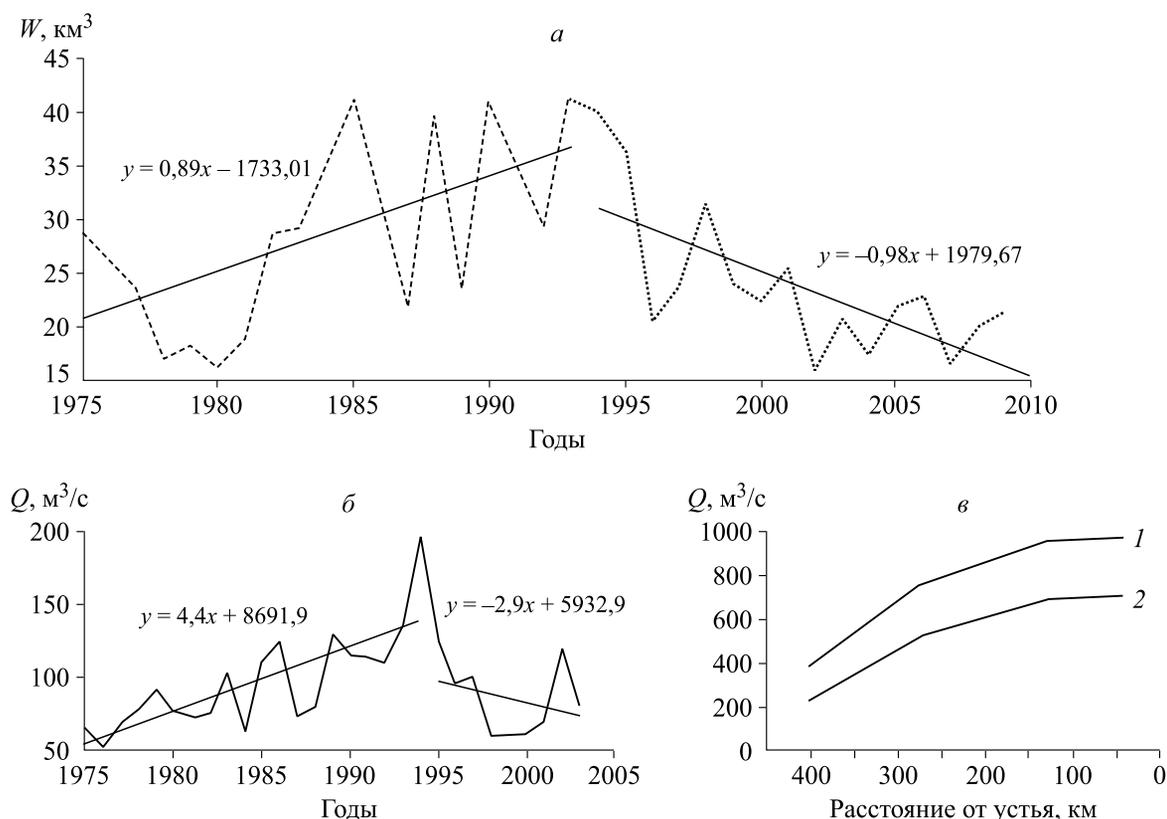


Рис. 3. Характеристики устойчивого периода среднегодовой водности р. Селенги в нижнем течении.

*a* — изменения объема годового стока; *б* — минимальные расходы воды р. Селенги (гидропост Мостовой) за период с 1975 по 2010 г. (линиями показаны направления трендов); *в* — продольное изменение водоносности р. Селенги в пределах российского участка до 1995 г. (1) и после 1996 г. (2).

На основе гидрометрических наблюдений получены достаточно достоверные данные о стоке наносов только в нижнем течении р. Селенги. Обобщение информации до 2015 г. по гидропосту Мостовой свидетельствует о том, что Селенга ежегодно выносит в Байкал 1,59 млн т взвешенных наносов, что соответствует среднегодовому расходу  $R = 50,5$  кг/с (1941–2015 гг., гидропост Мостовой). Сток наносов изменяется во времени. Если в 1941–1982 гг. он составлял 67,5 кг/с, то в 1982–2015 гг. уменьшился до 34,9 кг/с [9], что связано с общим снижением водности рек и уменьшением площадей пахотных земель [10]. Аналогичные тренды отмечены для рек, где также наблюдается период пониженной водности (правобережные притоки Селенги — Хилок и Куйтунка). Отсутствие достоверного снижения водности (р. Уда) определяет отсутствие значимых многолетних тенденций в изменении стока наносов. Для Селенги ниже устья Уды в условиях разветвленного широкопойменного русла при установленных темпах смещения крупных гряд (тип А, по классификации Н. И. Алексеевского [22]) 1390 м/год сток влекомых наносов составляет не менее 777 600 т/год, т. е. около 45 % суммарного стока наносов. Таким образом, суммарный сток наносов (взвешенных и влекомых) к дельте составляет 2,51 млн т в год.

Пространственная изменчивость стока наносов охарактеризована на основе данных мониторинга МГУ 2011–2015 гг. (см. таблицу) и численных расчетов. В периоды повышенного стока наблюдается продольное снижение мутности воды и стока наносов, что соответствует максимальному природному (степная зона) и антропогенному (крупные индустриальные центры) поступлению взвешенных веществ с водосбора верхних звеньев речной сети Селенги. В период прохождения летних паводков (июль–август) для большинства участков нижнего течения (Селенга ниже слияния с Орхоном) характерны процессы аккумуляции взвешенных частиц:

$$\Delta W = W_2 - W_1 < 0,$$

где  $W_1$  и  $W_2$  — расход взвешенных наносов на верхнем и на нижнем створе соответственно. Измерения, выполненные с 6 по 16 августа 2011 г. и соответствующие относительно однородным условиям

Характеристика экспедиционных данных о стоке наносов и расходов воды, используемая при проведении бассейнового анализа

Дата измерений	Сезон	Территория	Расход воды, м <sup>3</sup> /с		Мутность воды, мг/л			Взвешенные наносы								
			max	min	max	min	aver	Средний диаметр, мм		Доля глинистых фракций ( $D < 0,001$ мм), %		Доля органического вещества, %				
15.07–25.08.2011	Летние паводки	1	465	0,10	2850	6,4	229	0,12	0,01	0,04	31	1,08	7	16,3	0,92	6,75
			902	–	47	1,4	18	–	–	–	–	–	–	–	–	–
08.06–15.07.2012	Межень и начало паводков	1	107	0,07	1249	1,7	82	0,48	0,01	0,08	4,62	1,16	2,49	12,8	2,25	5,62
			1439	–	150	1,7	50	0,02	0,54	0,09	3,6	0,24	2,08	13,3	2,75	6,09
05–30.09.2013	Спад паводков	1	105	0,3	225	6,7	73	0,79	0,01	0,11	54,4	0,1	8	12,6	0,42	3,75
			–	–	43	2,0	25	0,92	0,02	0,21	4,9	0,1	2,8	23,6	6,21	2,26
06–25.08.2014	Летние паводки	1	–	–	147	0,51	43	0,576	0,015	0,22	9,2	1,6	4,57	–	–	–
			–	–	31	2,93	15,3	0,88	0,01	0,09	12,6	1,4	6,02	–	–	–
03–25.03.2015	Зимняя межень	1	64,8	0	312	0,68	18(5)*	0,32	0,03	0,08	41,2	0,6	4,97	3,99	0,23	0,71
			–	–	9,12	0,91	2,2	0,21	0,02	0,07	–	–	–	–	–	–

Примечание. Измеренные значения: max — максимальное, min — минимальное, aver — среднее. 1 — в пределах Монголии, 2 — в пределах России. Прочерк — измерения не проводились.

\* При исключении р. Туул ниже Улан-Батора.

формирования повышенного (паводочного) стока в пределах бассейна, демонстрируют среднесуточную сезонную аккумуляцию 2445 т/сут взвешенных наносов на верхнем отрезке российского участка Селенги [23]. На спаде фазы повышенной водности реки удельная интенсивность перехода взвеси в состав влекомых наносов или речных отложений здесь составляет 16,3 кг/(м·сут). Продольное увеличение расходов взвешенных наносов наблюдается в период межени, в первую очередь за счет привноса материала от боковых притоков. Максимальный расход взвешенных наносов в этот сезон отмечается в створе выше дельты р. Селенги.

Хозяйственная деятельность проявляется относительно слабо в характеристиках стока наносов. Центры горной промышленности и крупнейшие агломерации (Улан-Батор и Улан-Удэ) оказывают влияние на речную систему лишь на локальных участках рек. Применение регрессионного анализа позволило получить набор уравнений (модель Selenga Statistica) для оценки среднемесячных значений мутности воды  $S$  в бассейне Селенги:

$$S_{\text{июль}} = 0,551СМ + 0,439ТР - 0,12ВЛ - 63,9,$$

$$S_{\text{сент}} = 0,678РС - 0,02ГЛ + 0,222I - 0,51СГ + 22,8,$$

$$S_{\text{авг}} = 0,458РС + 0,33КП + 0,169ДР + 0,145Л + 0,241ПНЗ - 0,17I - 9,4,$$

$$S_{\text{март}} = 1,2ПН + 0,11I + 0,456ГЛ + 0,356НВУ + 0,618ПСТБ - 55,2,$$

где СМ — сезонная мерзлота; ТР — тундровая растительность; ВЛ — высокогорья, ледники; РС — равнинные степи; ГЛ — горно-таежные леса; ПСТБ — пастбища; НВУ — территории с близким залеганием многолетней мерзлоты, сокращающим процессы почвообразования; КП — каменистые пастбища; ДР — денудационные равнины; Л — леса; СГ — среднегорья (все показатели измеряются в % от площади водосбора);  $I$  — уклон водосбора, град.; ПН — плотность населения, чел/км<sup>2</sup>, ПНЗ — плотность нарушенных земель, км<sup>2</sup>/тыс. км<sup>2</sup> (средневзвешенная). Параметры хозяйственной деятельности (распространение пашен, пастбищ и общая доля нарушенных земель) лишь в отдельные сезоны оказывают достоверное влияние на значения мутности воды, стока наносов и крупность взвеси в бассейне. Важным фактором для понимания пространственно-временных особенностей формирования стока наносов является существование значительной вариальности предикторов мутности воды в разные месяцы (фазы водного режима).

**Прогнозная оценка водного баланса р. Селенги при ожидаемых антропогенных воздействиях.** Адаптация для бассейна Селенги разнообразного численного инструментария (см. рис. 2) служит основой

для выполнения прогнозных оценок, базирующихся на учете как климатической изменчивости, так и антропогенного воздействия на характеристики речного стока. На данном этапе работы выполнен прогноз региональных изменений стока воды в связи с антропогенным освоением территории, базирующийся на региональной климатической модели COSMO-CLM и водно-балансовой оценке изменений среднемесячного стока воды р. Селенги при строительстве гидроузлов (см. рис. 2).

Региональные изменения водного баланса бассейна Селенги в связи с антропогенным освоением территории в модели COSMO-CLM основаны на данных реанализа ERA Interim с временным разрешением 6 ч. Были проведены эксперименты для двух временных периодов, резко контрастирующих между собой по условиям увлажнения («сухой» и «влажный») [19]. В качестве «сухого» был выбран летний период (июнь–август) 1979 г., в качестве «влажного» — летний период 1985 г. Расчет проводился также для непрерывного периода с мая 2004 г. по август 2012 г. (условный «климатический эксперимент»). Для каждого из этих временных отрезков выполнены модельные эксперименты в рамках следующих сценариев антропогенного изменения ландшафтов: сценария, характеризующего современное состояние ландшафтов (по данным [24]), и сценария максимального воздействия, характеризующего возможное использование территории Монголии для создания предприятий горнодобывающей промышленности (лицензионные области добычи полезных ископаемых 2010 г.) (по данным [25]) (см. рис. 1).

Зоны разработок полезных ископаемых описывались путем уменьшения значений коротковолнового альбедо земной поверхности с исходных 25–35 % (для ненарушенного ландшафта) до 10 % в пределах потенциальных участков сведения растительного покрова. Оценивалась разность среднегодовых сумм осадков для периода 2004–2012 гг. между результатами эксперимента с ландшафтом, измененным добычей полезных ископаемых, и эксперимента с естественным ландшафтом ( $\Delta P = P_{\text{антроп. сцен.}} - P_{\text{естеств. сцен.}}$ ) (см. рис. 3). По итогам расчетов выявлено изменение полей осадков для сценария преобразования ландшафта (сведение растительности), в отдельных районах (как с сухими аномалиями, так и с дождливыми) достигающее 80–100 мм. Для разных климатических сценариев (сухой или влажный год) смоделированное изменение ландшафта вызовет изменение летних осадков до 20 % и летней температуры воздуха до 0,2 °С. Осреднение значения среднегодовых сумм осадков как по всему бассейну, так и по районам максимального изменения ландшафтных характеристик не показывает значимых изменений за счет взаимного наложения аномалий разного знака. В бассейне Селенги в годовом масштабе осреднения не ожидается проявления и температурного отклика на изменение ландшафтов в пределах Монголии. Непосредственно в районах добычи полезных ископаемых возможно увеличение среднегодовой температуры воздуха на 0,3 °С.

Водный баланс территории может измениться при реализации проектов гидротехнического строительства. Для расчета составляющих водного баланса проектируемых водохранилищ использованы карты средних многолетних величин атмосферных осадков и испарения с водной поверхности (испаряемости) [26]. Расчеты показали, что из-за увеличения потерь воды на испарение с затопленных участков бассейна при образовании водоемов (без учета потерь стока на их наполнение) сток зарегулированных рек сократится в сумме за год на 0,11 км<sup>3</sup>, что составляет не более 0,5 % от величины среднегодового стока Селенги вблизи устья. С учетом проекта переброски стока из бассейна р. Орхон для водоснабжения добывающих производств на юго-востоке страны увеличение потерь стока р. Орхон составит 0,08 км<sup>3</sup>/год, суммарные потери с учетом видимого испарения — 0,7–0,9 % стока Селенги в устье. Указанные потери стока на испарение с проектируемых водохранилищ и водозабор на переброску стока могут соответствовать снижению уровня воды в Байкале до 1 см/год (при современных климатических условиях и режиме регулирования Иркутской ГЭС).

Для оценки последствий строительства водохранилища на р. Эгийн-Гол (см. рис. 1) использован подход к оценке смещения водных масс [27] с допущением, что на участке, где расход воды становится соизмеримым с удвоенным расходом сброса ГЭС, в речном русле происходит трансформация основной водной массы (ОВМ) водохранилища в трансформированную речную водную массу (ТВМ). Главным очагом формирования стока с зональными характеристиками становится часть бассейна речной системы, расположенная ниже створа гидроузла. За счет поступления воды из незарегулированных притоков, несущих характерные для данной зоны водные массы, постепенно восстанавливаются водный, термический, химический режим зарегулированной реки и сток наносов.

Суммарный приток рек, формирующих сток Селенги выше впадения в нее р. Эгийн-Гол, превышает потенциальный сброс ГЭС только в период с мая по сентябрь. В остальные месяцы сбросы воды гидроузлом значительно превышают естественный сток в маловодную межень (рис. 4, а). Впадение р. Орхон будет восстанавливать зональные характеристики объема стока за более длинный

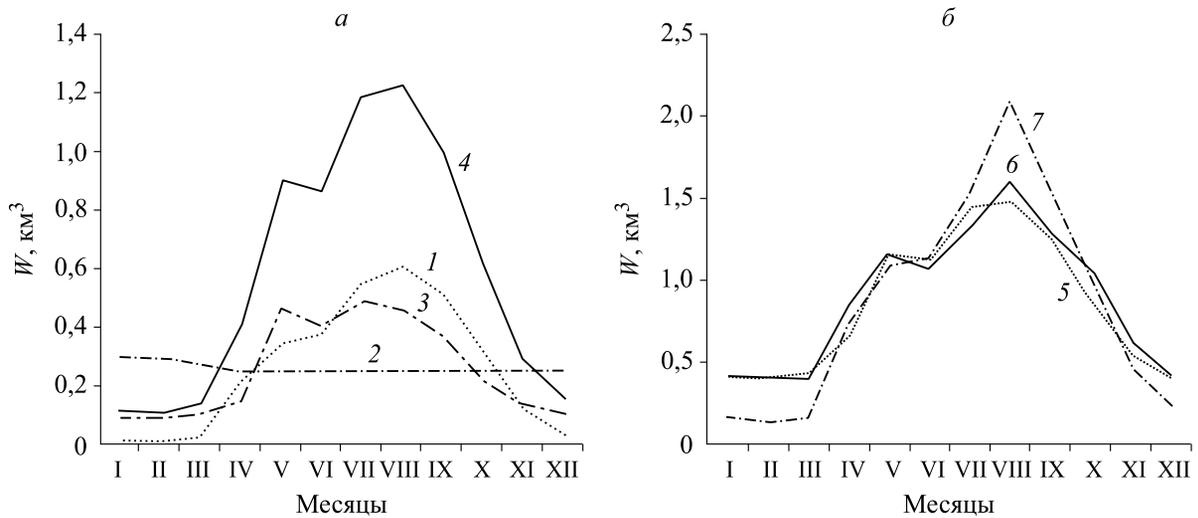


Рис. 4. Среднемесячные значения сброса воды в нижний бьеф водохранилища Эгийн и нарастающая сумма стока притоков Селенги (а) и сравнение природного стока р. Селенги в створе Наушки и трансформированного стока с учетом работы гидроузлов в этом же створе (б).

1 — естественный сток р. Эгийн-Гол, 2 — потенциальные объемы сброса ГЭС Эгийн, 3 — суммарный сток притоков Селенги выше впадения р. Эгийн-Гол, 4 — суммарный сток притоков Селенги выше впадения рек Эгийн-Гол и Орхон, 5 — сток Селенги в створе Наушки при введении в эксплуатацию ГЭС Чаргайт и Эгийн, 6 — сток Селенги в створе Наушки при введении в эксплуатацию только ГЭС Эгийн, 7 — естественный сток Селенги в створе Наушки.

период — с апреля по октябрь, в остальные пять месяцев сброс ГЭС Эгийн может превышать суммарный сток притоков Селенги, формирующих ее сток до граничного створа. При введении в эксплуатацию одного или двух гидроузлов на притоках Селенги ее низкий зимний сток воды на границе с РФ увеличится в 2–3 раза (см. рис. 4, б), а уменьшение стока будет наиболее существенным (на 20–30 %) в августе–сентябре.

Комплексный анализ изменений стока в устье Селенги при реализации проектов строительства четырех гидроузлов [11] показал, что эксплуатация ГЭС Шурэн при отсутствии ГЭС Чаргайт и ГЭС Эгийн будет уменьшать внутригодовые колебания стока реки в 1,1–1,2 раза, сокращая максимальный среднемесячный сток на 5–6 % и увеличивая минимальный зимний сток на 57–63 %. При зарегулировании притока к ГЭС Шурэн сокращение максимального среднемесячного стока составит 14–15 %, а увеличение минимального зимнего стока — 73–75 %. Несмотря на то что 2/3 стока Селенги формируется на территории РФ, влияние регулирования на изменение внутригодового режима стока будет существенным, особенно в зимний период.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для оценки и прогноза стока воды и наносов водотоков бассейна р. Селенги разработан интегральный подход, объединяющий водно-балансовый метод, метод бассейнового регрессионного анализа (характеристик стока наносов) и детерминированные модели формирования стока воды и наносов и внутриводоемных процессов разного пространственного масштаба. Установлен ряд закономерностей современных и ожидаемых изменений стока воды и наносов.

Выявлено, что современные климатические колебания проявляются в снижении стока воды и наносов р. Селенги, при этом отмечается снижение максимальных и увеличение минимальных расходов воды в нижнем течении Селенги. Оценка суммарного стока наносов (взвешенных и влекомых) показала, что в современных гидроклиматических условиях (период маловодья, продолжающий с 1995 г.) к дельте Селенги поступает 2,51 млн т наносов в год. Эта величина почти в два раза ниже среднемноголетнего стока наносов за многоводный период (до 1995 г.). Отдельные реки испытывают значительное увеличение стока наносов в связи с влиянием хозяйственной деятельности (сельское хозяйство и горнодобывающая промышленность), однако это воздействие ограничено локальными участками ниже

крупных промышленных центров. Разработанная бассейновая регрессионная модель стока наносов представляет собой задел для прогнозирования вещественных потоков в бассейне Селенги.

Кроме того, адаптация мезоклиматической модели COSMO\_CLM для оценки региональных климатических изменений свидетельствует о трансформации водного баланса территории в результате антропогенного изменения ландшафтов при реализации проектов добычи полезных ископаемых. Смоделированное изменение ландшафта соответствует трансформации летних осадков в отдельных узлах сетки на 20 %, а летней температуры — до 0,2 °С. При этом осредненные по бассейну Селенги значения суммарного летнего количества осадков и средней температуры воздуха в результате уменьшения значений коротковолнового альбеда земной поверхности, возникающего при сведении растительности вследствие горнодобывающей деятельности, изменяются не более чем на 1 % по сравнению с современными условиями.

Сделан вывод, что гидротехническое строительство в бассейне р. Селенги на территории Монголии по данным водно-балансовой оценки приведет к двух-трехкратному увеличению зимнего стока и его уменьшению в летний период. Дальность распространения изменений и их масштаб будут зависеть от количества и расположения гидроузлов: наибольшее влияние окажет строительство ГЭС на основном русле, наименьшее — на притоках р. Селенги.

Таким образом, впервые получена количественная оценка влияния развития хозяйственной деятельности в бассейне Селенги на сток воды и наносов. Разработанный методический аппарат и его дальнейшее внедрение позволят получить региональную прогностическую систему, учитывающую как гидроклиматические, так и антропогенные факторы трансформации речного стока. Применение динамических и статистических подходов открывает возможности проведения инерционных и физически обоснованных прогнозов.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 14–27–00083), Российского фонда фундаментальных исследований (15–05–05515, 15–05–03752) и Программы развития ООН (UNDP) (грант «Integrated Natural Resource Management in the Baikal Basin Transboundary Ecosystem»).*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Афанасьев А. Н.** Водные ресурсы и водный баланс бассейна озера Байкал. — Новосибирск: Наука, 1976. — 238 с.
2. **Синюкович В. Н.** Водный баланс бассейна реки Селенги // География и природ. ресурсы. — 2008. — № 1. — С. 72–75.
3. **Nadmitov B., Hong S., Kang S. I., Chu J. M., Gomboev B., Janchivdorj L., Lee C. H., Khim J. S.** Large-scale monitoring and assessment of metal contamination in surface water of the Selenga River Basin (2007–2009) // Environ. Sci. Pollut. R. — 2014. — N 22 (4) — P. 2856–2867.
4. **Battulga P., Dae P. Y., Senjim B., Tsagaantsooj N.** The impact of forest degradation in Tuul river basin's surface water resources // IHP VII Technical Documents in Hydrology. — 2009. — N 1. — P. 57–64.
5. **Bayamba B., Todo Y.** Technological impact of placer gold mine on water quality: case of Tuul river valley in the Zaamar Goldfield, Mongolia // Eng. Tech. — 2011. — N 75. — P. 167–175.
6. **Theuring P., Rode M., Behrens S., Kirchner G., Jha A.** Identification of fluvial sediment sources in a meso-scale catchment, Northern Mongolia // Hydrological Processes. — 2013. — N 27 (6). — P. 845–856.
7. **Сороковикова Л. М., Поповская Г. И., Томберг И. В., Синюкович В. Н., Кравченко О. С., Мариняте И. И., Башенхаева Н. В., Ходжер Т. В.** Качество воды реки Селенги на границе с Монголией в начале XXI в. // Метеорология и гидрология. — 2013. — № 2. — С. 9–103.
8. **Хажеева З. И., Плюснин А. М.** Современная водохозяйственная деятельность в бассейне реки Селенги и влияние ее на экологическое состояние водотоков // География и природ. ресурсы. — 2012. — № 4. — С. 48–52.
9. **Потёмкина Т. Г.** Тенденции формирования стока наносов основных притоков озера Байкал в XX и начале XXI столетия // Метеорология и гидрология. — 2011. — № 12. — С. 63–71.
10. **Баженова О. И., Кобылкин Д. В.** Динамика процессов деградации почв в бассейне Селенги в земледельческий период // География и природ. ресурсы. — 2013. — № 3. — С. 33–40.
11. **Гречушников М. Г., Эдельштейн К. К.** Экспресс-оценка последствий гидротехнического строительства в бассейне реки Селенги // Вод. хоз-во России: проблемы, технологии, управление. — 2016. — № 1. — С. 66–82.
12. **Справка** международной экологической коалиции «Реки без границ» по проектируемым в МНР плотинам в бассейне реки Селенга [Электронный ресурс]. — [http://solex-un.ru/sites/solex-un/files/review-page/spravka\\_rwb\\_042015\\_mongolskie\\_ges.pdf](http://solex-un.ru/sites/solex-un/files/review-page/spravka_rwb_042015_mongolskie_ges.pdf) (дата обращения 20.06.2016).

13. **Эгийн-Гол** ГЭС [Электронный ресурс]. — <http://www.eghpp.mn/en/news/more105.html> (дата обращения 20.06.2016).
14. **Böhm U., Kücken M., Ahrens W., Block A., Hauffe D., Keuler K., Rockel B., Will A.** CLM — the climate version of LM: brief description and long-term applications // COSMO Newsletter. — 2006. — N 6. — P. 225–235.
15. **Wilkinson S., Olley J., Prosser I., Read A.** Targeting erosion control in large river systems using spatially distributed sediment budgets // Geomorphological Processes and Human Impacts in River Basins. IAHS Publ. — 2005. — N 299. — P. 56–64.
16. **Pietron J., Jarsjö J., Romanchenko A. O., Chalov S. R.** Model analyses of the contribution of in-channel processes to sediment concentration hysteresis loops // Journ. Hydrology. — 2015. — N 522. — P. 576–589.
17. **Пуклаков В. В.** Гидрологическая модель водохранилища: руководство для пользователей. — М.: ГЕОС, 1999. — С. 96.
18. **Shimaraev M. N., Verbolov V. I., Granin N. G., Sherstyankin P. P.** Physical limnology of Lake Baikal: A review.— Okuda; Irkutsk: Okayama, 1994. — 81 p.
19. **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 природ. ресурсы. — 2012. — № 3. — С. 61–68.
20. **Семёнов В. А., Магмаржав Б.** Гидрологический режим рек бассейна р. Селенги и методы его расчета. — Л.: Гидрометеиздат, 1977. — 233 с.
21. **Törnqvist R., Jarsjö J., Pietron J., Bring A., Rogberg P., Asokan S.M., Destouni G.** Evolution of the hydro-climate system in the Lake Baikal basin // Journ. Hydrology. — 2015. — N 519. — P. 1953–1962.
22. **Алексеевский Н. И.** Формирование и движение речных наносов. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 1998. — 202 с.
23. **Chalov S., Jarsjö J., Kasimov N., Romanchenko A., Pietron J., Thorslund J., Belozerova E.** Spatio-temporal variation of sediment transport in the Selenga River Basin, Mongolia and Russia // Environ. Earth Sci. — 2015. — Vol. 73, N 2. — P. 663–680.
24. **Экологический атлас** бассейна озера Байкал [Электронный ресурс]. — <http://bic.iwlearn.org/ru/atlas/atlas> (дата обращения 25.04.2016).
25. **Золотые реки: Вып. 1: Амурский бассейн** / Под ред. Е. А. Симонова. — Владивосток: Всемирный фонд дикой природы (WWF), изд-во «Апельсин», 2012. — 120 с.
26. **Атлас мирового водного баланса** / Ред. А. А. Соколов. — М.; Л.: Гидрометеиздат, 1974. — 96 с.
27. **Эдельштейн К. К.** Гидрология материков. — М.: Академия, 2005. — 304 с.

*Поступила в редакцию 4 июля 2016 г.*