

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕНОСА ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ ПО РЕКЕ СЕЛЕНГЕ НА ТЕРРИТОРИИ МОНГОЛИИ И РОССИИ*

© 2014 г. Э.М. Зоимонова, Б.О. Гомбоев, А.Б. Зандакова

*Байкальский институт природопользования Сибирского отделения
Российской академии наук, Республика Бурятия, г. Улан-Удэ*

Ключевые слова: трансграничный перенос загрязняющих веществ, моделирование массотока загрязняющих веществ вдоль речного русла.



Э.М. Зоимонова



Б.О. Гомбоев



А.Б. Зандакова

Представлено моделирование переноса загрязняющих веществ (ЗВ) в бассейне р. Селенги и вклада трансграничного переноса с территории Монголии в общем поступлении ЗВ в оз. Байкал. Расчеты показали, что объем многих загрязняющих веществ, поступивших в оз. Байкал со стоком р. Селенги с территории Монголии, не превышает 30 %. Основная часть объема ЗВ, поступивших в оз. Байкал со стоком р. Селенги, формируется на территории России (Республика Бурятия и Забайкальский край).

Проблема рационального использования и охраны вод оз. Байкал от загрязнения и истощения вызывает закономерный интерес к гидрологическому режиму и гидрохимическому составу рек бассейна. Река Селенга является основным притоком оз. Байкал, ее бассейн занимает 80 % всего водосбора озера, а сток реки – почти 50 % общего притока в озеро. На территории Монголии формируется 46 % годового стока р. Селенги. Площадь водосбора 447,06 тыс. км², в том числе на территории России 148,06 тыс. км² (33 %),

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ-Сибирь, грант № 12-05-98096 «Научные основы интегрированной модели управления водными ресурсами на Байкальской природной территории».

на территории Монголии 299 тыс. км² (64 %). Селенга образуется в результате слияния двух рек Мурэн и Идэр. Длина р. Селенги 1024 км, протяженность на монгольской части 615 км, на российской 409 км. За исток принято считать более водоносную и длинную р. Идэр, расстояние от устья р. Селенги до истока р. Идэр 1453 км. По территории Монголии река течет на восток и северо-восток, после пересечения государственной границы Монголии и России круто поворачивает на север и впадает в оз. Байкал. При впадении в озеро она образует обширную дельту, площадь которой 546 км² [1].

Бассейн р. Селенги несет большую антропогенную нагрузку. Результаты ежегодно проводимых работ по оценке воздействия на водные ресурсы объектов хозяйственной деятельности, расположенных в бассейнах трансграничных рек (Селенга, Онон) свидетельствуют о продолжающемся загрязнении водосборного бассейна и оз. Байкал недостаточно очищенными сточными водами и промышленными выбросами предприятий промышленности и жилищно-коммунального хозяйства. В 2012 г. общий объем сброса в поверхностные водные объекты бассейна р. Селенги по Монголии составил более 230 000 тыс. м³, по Республики Бурятия – 434 122 тыс. м³. На территории республики Бурятия непосредственно в Селенгу поступает 77 %, а в ее притоки около 12 % от общего количества загрязняющих веществ, сбрасываемых со сточными водами в водные объекты [2].

Для оценки количественной характеристики негативного антропогенного воздействия на поверхностные воды бассейна р. Селенги и оз. Байкал проводили расчет переноса загрязняющих веществ (ЗВ) вдоль речного русла через заданные створы, в том числе приграничные створы для оценки трансграничного переноса ЗВ. В данном исследовании для расчета выноса ЗВ была использована усовершенствованная методика определения выноса (переноса) загрязняющих веществ с речным стоком РД 52.24.748-2010, разработанная специалистами Государственного учреждения «Гидрохимический институт» (ГУ ГХИ) и утвержденная Росгидрометом 11 ноября 2010 г. [3].

Расчет величины выноса (переноса) ЗВ за заданный период осуществляют по формуле

$$G = CV, \quad (1)$$

где G – величина выноса ЗВ с речным стоком за выделенный характерный период (сезон) в заданном году или многолетии, т;

C – рассчитанная по уравнению регрессии средняя концентрация ЗВ, соответствующая условиям среднего расхода речной воды в выделенном характерном периоде (сезоне) за заданный год или многолетие, мг/дм³ (г/м³);

V – водный сток за выделенный расчетный период (сезон) в заданном году или многолетии, млн м³ [3].

Наблюдения за загрязнением поверхностных вод осуществляют согласно ГОСТ 17.1.3 «Правила контроля качества воды водоемов и водотоков». В пробах определяют химический состав воды, содержание загрязняющих веществ органического и неорганического происхождения, биогенных элементов.

Расчет переноса проводили по следующим ЗВ: взвешенные вещества; химическое потребление кислорода (ХПК); биохимическое потребление кислорода (БПК₅); азот аммония; азот нитрит-иона; азот нитрат-иона; фенолы; нефть и нефтепродукты; железо общее; медь; цинк; марганец; сульфаты; фториды; хлориды.

Контроль качества воды бассейна р. Селенги ведет Бурятский центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды в государственных гидропостах в 21 створе, а также Центральная лаборатория по мониторингу и метеорологии окружающей среды Монголии в 24 створах, расположенных на территории Монголии. Два из них являются приграничными: в г. Сухбаатар (Монголия) и пос. Наушки (Республика Бурятия).

Анализ качества воды в пос. Наушки и в с. Мурзино показал, что изменение качества воды по разным показателям неравномерно. Ухудшение качества воды вдоль р. Селенги от приграничного до устьевых створов произошло по БПК₅ – на 66 %, фенолам – на 44 %, цинку – на 13 %, меди – на 11 %. Концентрации ЗВ в створе п. Наушки значительно превышали значения в створе

Таблица 1. Характеристика воды р. Селенги в 2012 г.

Показатель (ПДК)	Единица измерения	пос. Наушки (Республика Бурятия)		с. Мурзино (Республика Бурятия)		Изменение концентрации ЗВ в с. Мурзино и пос. Наушки
		Пределы концентраций	Средняя в створе	Пределы концентраций	Средняя в створе	
Взвешенные вещества	мг/дм ³	2,1–138	35,59	2,5–95,4	37,92	1,07
Растворенный кислород (4,0–6,0)	мг/дм ³	6,74–11,9	9,64	7,8–12,6	9,91	1,03
ХПК (15,0)	мгО/дм ³	9,3–26,3	15,42	9,6–24,2	15,82	1,03
БПК ₅ (2,0)	мгО ₂ /дм ³	0,57–1,41	1,077	0,71–3,27	1,784	1,66
Азот аммонийный (0,4)	мг/дм ³	0–0,14	0,044	0–0,04	0,007	0,16
Азот нитритный (0,02)	мг/дм ³	0–0,004	0,0023	0–0,008	0,0021	0,91
Азот нитратный (9,1)	мг/дм ³	0,01–0,29	0,106	0–0,29	0,057	0,54
Медь (1,0)	мг/дм ³	0–6,9	2,81	0,9–8,1	3,11	1,11
Фенолы (0,001)	мг/дм ³	0–0,002	0,0009	0–0,002	0,0013	1,44
Нефтепродукты (0,05)	мг/дм ³	0–0,06	0,02	0–0,02	0,008	0,40
Железо (0,1)	мг/дм ³	0,08–2,13	0,57	0,11–0,82	0,44	0,77
Цинк (10,0)	мкг/дм ³	8,1–13,2	11,42	11,3–14,1	12,87	1,13

с. Мурзино по всей азотной группе, нефтепродуктам и железу. В табл. 1 представлена гидрохимическая характеристика воды на приграничном створе в пос. Наушки и на замыкающем створе в с. Мурзино.

Данные по годовому стоку по основным гидропостам Монголии и России в 2012 г. представлены в табл. 2 и рис. 1.

Таблица 2. Годовой сток воды по гидропостам Монголии и России в бассейне р. Селенги за 2012 г., млн м³

Река	Пост	2012	Река	Пост	2012
Монголия					
Бассейн р. Сэлэнга			Притоки		
Идэр	Дзурх	824	Хангал	Жаргалант	12
Сэлэнга	Тосонцэнгэл	911	Чулуут	Ундур-Улаан	254
Сэлэнга	Дзунбурен	5140	Делгермурен	Мурен	629
Сэлэнга	Сухэбагор	8867	Эг	Хантай	2172
			Орхон	Сухэбагор	3849
Российская Федерация (Республика Бурятия)					
Бассейн р. Селенги			Притоки		
Селенга	пос. Наушки	7600	Джида	пгт Джида	2075
Селенга	Новоселенгинск	19 868	Чикой	пос. Поворот	10 344
Селенга	г. Улан-Удэ	24 305	Хилок	с. Хайластуй	3119
Селенга	разъезд Мостовой	26 459	Уда	г. Улан-Удэ	2154
Селенга	с. Кабанск	26 743	Темник	улус Улан-Удунга	1028
			Куйтунка	с. Тарбагатай	11

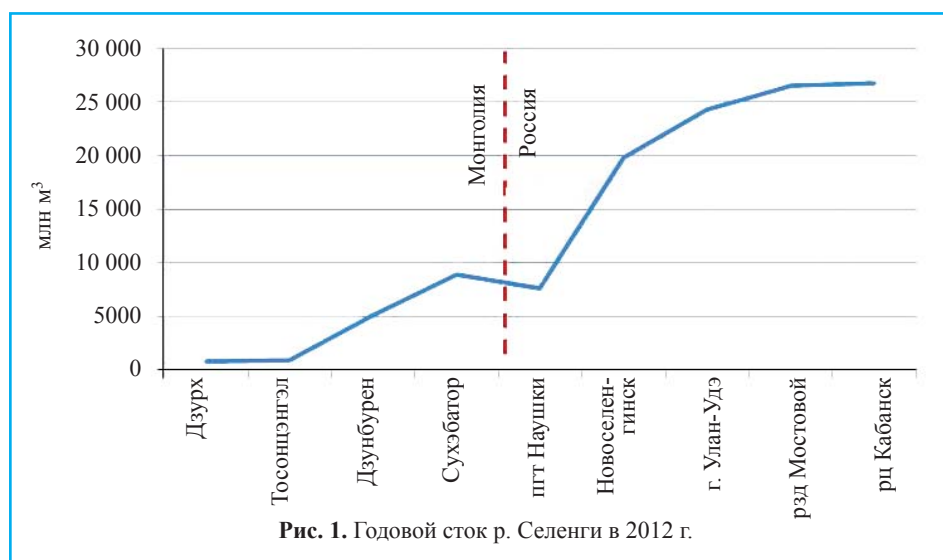


Рис. 1. Годовой сток р. Селенги в 2012 г.

Около 70 % стока р. Селенги формируется на территории двух субъектов Российской Федерации – Республики Бурятия и Забайкальского края, несмотря на то, что 2/3 бассейна р. Селенги находится на монгольской территории.

Для выявления характера изменений антропогенной нагрузки по данной методике рассчитана величина выноса загрязняющих веществ с водным стоком в период 2008–2012 гг. по створам реки, где проводили систематические гидрохимические наблюдения по вышеприведенным загрязняющим веществам. Приведем пример расчета переноса по БПК₅ (табл. 3, рис. 2, 3).

Общий привнос БПК₅ в оз. Байкал в 2012 г. составил 47,7 тыс. т. В целом с 2008 по 2012 гг. увеличение общего объема выноса БПК₅ в устье р. Селенги составило 54 %. Расчеты показали, что объемы выноса БПК₅ в замыкающем створе в с. Мурзино превышают значения в приграничном створе в пос. Наушки в 4–6 раз. Это объясняется тем, что большая часть БПК₅ попадает в р. Селенгу с притоками Чикой, Джиды и Уда, расположенными в российской части бассейна, в том числе со сточными водами Улан-Удэнского и Гусино-озерского промышленных узлов. Расчет переноса показал, что основной вынос БПК₅ в реку осуществляется на российской части бассейна.

Согласно расчетам, в период 2008–2012 гг. со стоком р. Селенги в среднем ежегодно в оз. Байкал поступало взвешенных веществ 653 тыс. т., ХПК 310 тыс. т, БПК₅ 36 тыс. т, нефтепродуктов 0,4 тыс. т, фенолов 17 т, СПАВ 0,21 тыс. т, соединений меди 52 т, цинка 328 т. Почти по всему перечню загрязняющих веществ наблюдалось увеличение объемов, за исключением азотной группы и нефтепродуктов (табл. 4).

В данном исследовании моделирование переноса ЗВ в бассейне р. Селенги проведено с помощью модели массотоков, разработанной группой красноярских ученых для задач автоматизированных систем контроля водохозяйственных мероприятий АСКВод «Енисей» и воплощенных в программном комплексе «ГХМодель» [4].

В модели представлена струйная теория объединения водотоков в реке. В ее основе лежит гидролого-гидравлическая модель водотоков (водохозяйственный баланс). На основе данного водохозяйственного баланса и гидрохимической информационной базы строится потоковая модель переноса ЗВ (балансы массотоков по ингредиентам). Таким образом, в рамках данного подхода создаются две модели: объединения струй воды (гидролого-гидравлическая) и объединения массотоков ЗВ (гидрохимическая) [4].

Моделирование гидрологической части проводят в пространственном распределении объемов водного потока р. Селенги от истока к устью. Для этого р. Селенга со всеми ее притоками моделируется графом, вершинами которого служат створы реки с гидростатами. Данные о расходах воды, получаемые на гидростатах, служат исходными для моделирования водохозяйственного баланса в речной системе.

Таблица 3. Вывнос БПК₅ в 2008–2012 гг. в бассейне р. Селенги, тыс. т

Страна	Река	Пост	2008	2009	2010	2011	2012	2012/2008
Монголия	Сэлэнгэ	Сухбаатар XII	17,64	15,99	18,72	15,84	15,87	0,90
Россия	Селенга	пос. Наушки	7,51	7,40	7,49	8,05	8,18	1,09
Россия	Селенга	пос. Новоселенгинск	24,71	20,22	26,28	29,18	35,59	1,44
Россия	Селенга	г. Улан-Удэ, 2 км выше города	25,03	38,12	29,84	24,94	37,98	1,52
Россия	Селенга	1 км ниже г. Улан-Удэ, 3 км выше с. Сотниково	32,71	30,68	34,21	27,90	41,41	1,27
Россия	Селенга	3,7 км ниже развязки Мостовой	41,60	31,53	34,69	24,00	42,53	1,02
Россия	Селенга	с. Кабанск, 23,5 км выше с. Кабанск, 4,3 км выше впадения р. Виллойка	32,82	33,73	51,81	24,51	48,40	1,47
Россия	Селенга	с. Кабанск, 19,7 км выше с. Кабанск, 0,5 км ниже впадения р. Виллойка	32,70	36,58	36,92	30,08	43,76	1,34
Россия	Селенга	с. Кабанск, 0,5 км ниже с. Кабанск	32,35	31,76	43,90	23,52	49,03	1,52
Россия	Селенга	с. Мурзино, 4 км ниже села	30,97	35,79	40,17	26,33	47,72	1,54
		Притоки						
Монголия	Дэлгэр мурэн	Мурэн	0,69	1,15	1,37	1,06		1,52
Россия	Модонкуль	г. Закаменск, 2 км выше города	н/д	н/д	0,01	0,05	0,04	н/д
Россия	Модонкуль	г. Закаменск, 1 км ниже сброса сточных вод ГОС	0,00	0,00	0,01	0,04	0,07	н/д
Россия	Джида	с. Хамней, 4 км выше села	0,00	0,00	1,24	1,94	1,26	н/д
Россия	Джида	ст. Джида 3,5 км к юго-западу от станции	5,79	4,12	1,28	3,13	3,74	0,65
Россия	Темник	улуус Улан-Удунга, 1 км к ЮЗ от улуса	0,94	2,10	2,13	1,62	1,69	1,79
Россия	Чикой	с. Чикой, 1 км выше Чикожзавода	5,11	6,90	7,22	4,69	10,37	2,03
Россия	Чикой	с. Поворот, 0,5 км выше села	7,13	7,25	10,41	9,39	20,58	2,89
Россия	Хилок	займка Хайластуй, на уровне займки	2,99	2,51	4,18	3,04	5,88	1,96
Россия	р. Куй-гунка	с. Тарбагатай, 0,2 км выше села	н/д	н/д	0,03	0,02	0,03	н/д
Россия	р. Брянка	ст. Заиграево, 0,2 км выше станции	н/д	н/д	0,31	0,13	0,18	н/д
Россия	р. Ула	г. Улан-Удэ, 1,0 км выше города	4,75	2,15	2,49	1,40	3,21	0,68
Россия	р. Ула	в черте города Улан-Удэ	4,72	1,92	2,34	1,51	3,20	0,68

Примечание: н/д – нет данных.

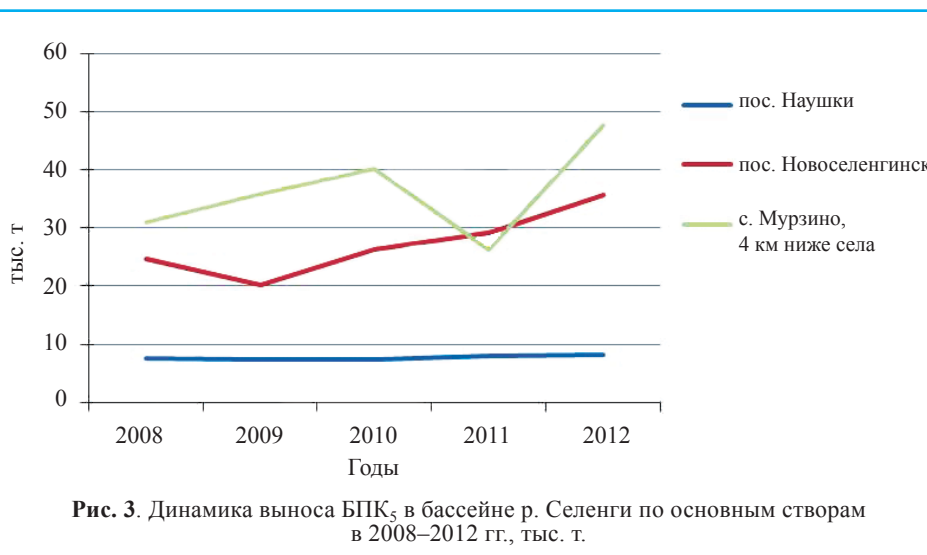
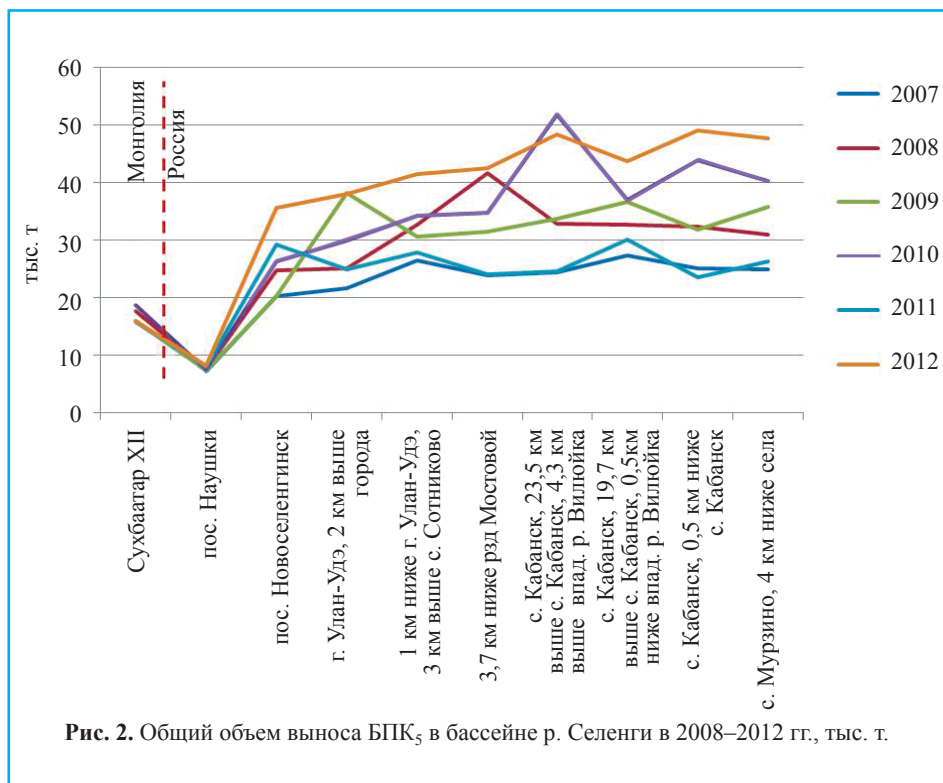


Таблица 4. Суммарное количество нормируемых веществ, поступивших в оз. Байкал со стоком р. Селенги

Загрязняющие вещества	Единицы измерения	2008	2009	2010	2011	2012	2012/2008
Взвешенные вещества	тыс. т	505,84	650,59	527,99	568,39	1014,14	2,00
ХПК	тыс. т	250,93	300,01	334,31	241,91	423,13	1,69
БПК ₅	тыс. т	30,97	35,79	40,17	26,33	47,72	1,54
Азот аммонийный	тыс. т	0,89	0,34	0,44	0,22	0,18	0,20
Азот нитритный	тыс. т	0,0598	0,0389	0,1725	0,0609	0,0565	0,94
Азот нитратный	тыс. т	3,04	0,73	2,03	0,57	1,52	0,50
Медь	т	54,09	53,00	52,84	19,57	83,20	1,54
Фенолы	т	8,87	12,16	15,48	14,77	35,66	4,02
Нефтепродукты	т	598,50	461,93	530,65	350,86	208,00	0,35
Железо общее	тыс. т	8,88	12,96	9,03	7,13	11,65	1,31
Цинк	т	289,27	504,20	319,05	182,81	344,09	1,19
Сульфаты	тыс. т	190,09	255,36	280,08	254,71	212,73	1,12
Хлориды	тыс. т	35,79	48,08	52,73	47,96	40,05	1,12
СПАВ	тыс. т	0,15	0,20	0,22	0,20	0,17	1,13
Фосфор фосфатов	тыс. т	0,11	0,15	0,17	0,15	0,13	1,18

Водохозяйственный баланс – это модель упорядоченного изменения расходов воды в живых сечениях водотока по мере перемещения воды от истока к устью реки. В общем виде водохозяйственный баланс описывается уравнением

$$Q_i = Q_{i-1} + \sum_k QR_{ik} + \sum_l QP_{il} - \sum_m Z_{im}, \quad (2)$$

где Q_i – годовой сток воды в i -й вершине (створе);

QR_{ik} – годовой сток k -го притока, поступающего на участке реки между $(i-1)$ -й и i -й вершинами;

QP_{il} – годовые сбросы l -го предприятия на участке реки между $(i-1)$ -й и i -й вершинами;

Z_{im} – забор воды m -ми предприятиями на участке реки между $(i-1)$ -й и i -й вершинами.

Вершина графа обозначает створ реки, куда вода поступает из предыдущей вершины, а также притоков и сточных вод предприятий. Уменьшение объема воды происходит за счет забора воды предприятиями. Таким образом, водоток представляет сумму частей истоковых и присоединенных расходов воды за вычетом расходов изъятия [4].

В табл. 5 приведен водохозяйственный баланс стока р. Селенги за 2012 г. Набор строк в соответствии с перечнем створов составляет таблицу водохозяйственных характеристик створов. При перемещении воды от створа к створу в реке расход воды возрастает в каждой группе (статье баланса). Итоговая таблица содержит девять числовых колонок, которые являются статьями баланса.

Статьи с первой по шестую являются приходной частью баланса. Седьмая и восьмая представляют расходную часть баланса. Первая статья отражает годовой сток в истоке и по притокам, по которым они известны; третья – попутную приточность воды, включающей притоки с неизвестными стоками воды; пятая статья – сточные воды, сбрасываемые водопотребителями; седьмая – забор воды, отбираемый предприятиями из реки для использования за пределами водотока; девятая – суммарный накопленный расход воды в реке по створу [4].

В таблицу баланса добавили столбец, содержащий коэффициент антропогенной доли сточных вод в расходе воды в реке

$$K_{q,k} = \frac{\sum_{i=1}^k Q_i^{(2)}}{Q_k^{(3)}}, \quad (3)$$

где $Q_i^{(2)}$ – расход внедрённой струи сточных вод номер i , м³/с;

$Q_k^{(3)}$ – расход воды в реке в створе k , м³/с, и три столбца коэффициентов остатка, которые заполняются после выполнения гидравлических расчетов. Коэффициенты выбираются из таблицы по условиям:

$$\mu_x \geq \alpha_{k-1} \text{ и } \mu_{500} \geq \alpha_k, \quad (4)$$

где α_{k-1} – коэффициент предельного фонового остатка струи в створе $(k-1)$, расположенном выше створа k на удалении X ;

α_k – коэффициент предельного фонового остатка струи в створе, расположенном на 500 м ниже створа k по течению реки [4].

Также был проведен гидравлический расчет основного русла (табл. 6).

Коэффициент Шези рассчитывается по Павловскому.

Ширина водотока определяется из выражения

$$B = \frac{\sum Q}{HV}, \quad (5)$$

где $\sum Q$ – полный расход воды в створе, м³/с;

H – средняя глубина, м;

V – средняя скорость течения, м/с.

Глубина воды определяется по [5]

$$h_{cp} = 0,22\sqrt{Q}. \quad (6)$$

Таблица 5. Водохозяйственный баланс стока р. Селенги за 2012 г.

Створ	Ст. 1	Ст. 2	Ст. 3	Ст. 4	Ст. 5	Ст. 6	Ст. 7	Ст. 8	Ст. 9	Антропогенная доля, % расхода	Доля остатка к створу	Доля m остатка на 500 м	Предел доли остатка
	Ст. 1	Ст. 2	Ст. 3	Ст. 4	Ст. 5	Ст. 6	Ст. 7	Ст. 8	Ст. 9	%	μ_x	μ_{500}	μ_n
1. р. Идэр	824	824		0		0		0	824	0,00	0	0,000	0,000
2. р. Морон	629	1453		0		0		0	1453	0,00	0,008	0,433	0,433
3. р. Чулуут	254	1707		0		0		0	1707	0,00	0,433	0,149	0,149
4. п. Тосонцэнгэл	0	1707	85	85		0		0	1792	0,00	0,149	0,000	0,000
5. р. Эг	2172	3879		85		0		0	3964	0,00	0,000	0,548	0,548
6. р. Хангал	12	3891		85		0		0	3976	0,00	0,548	0,082	0,003
7. п. Дзунбурэн	0	3891	1164	1249		0		0	5140	0,00	0,004	0,000	0,000
8. р. Орхон	3094	6985		1249		0		0	8234	0,00	0,000	0,376	0,376
9. г. Сухбаатар	0	6985		1249		0		0	8234	0,00	0,376	0,000	0,000
10. п. Наушки	0	6985		1249		0		0	8234	0,00	0,000	0,000	0,000
11. р. Джида	1795	8780		1249	1,1	1,1	0	0	10030,1	0,01	0,000	0,179	0,179
12. р. Темник	889	9669		1249	1,1	1,1		0	10919,1	0,01	0,179	0,100	0,081
13. р. Чикой	8950	18619		1249	1,1	1,1		0	19869,1	0,01	0,081	0,450	0,450
14. п. Новоселенгинск	0	18619		1249	391,2	392,3	408,7	408,7	19851,6	-0,08	0,450	0,096	0,020
15. р. Хилок	3119	21738		1249		392,3		408,7	22970,6	-0,07	0,020	0,136	0,136
16. р. Кутунка	11	21749		1249		392,3		408,7	22981,6	-0,07	0,136	0,082	0,000
17. 2 км выше г. Улан-Удэ	0	21749	1307	2556	0	392,3	6,2	414,9	24282,4	-0,09	0,008	0,000	0,000
18. р. Уда	2154	23903		2556		392,3		414,9	26436,4	-0,09	0,000	0,105	0,081
19. 1 км ниже г. Улан-Удэ	0	23903		2556	27,7	420	2,8	417,7	26461,3	0,01	0,081	0,085	0,001
20. рзд Мостовой	0	23903		2556	0	420	0,2	417,9	26461,1	0,01	0,012	0,000	0,000
21. 23 км выше с. Кабанск	0	23903	284	2840	1,4	421,4	1,2	419,1	26745,3	0,01	0,000	0,078	0,000
22. 19,5 км выше с. Кабанск	0	23903		2840	1,3	422,7	0	419,1	26746,6	0,01	0,028	0,078	0,000
23. с. Кабанск	0	23903		2840	0	422,7	1,4	420,5	26745,2	0,01	0,012	0,000	0,000
24. с. Мурзино	0	23903		2840		422,7		420,5	26745,2	0,01	0,000	0,000	0,000

Таблица 6. Гидравлический расчет для основного русла

Створ	Расстояние между створами	Уклон поверхностного водотока	Коэффициент шероховатости	Расход воды в струе, м ³ /с	Расход сточных вод, м ³ /с	Коэф-фициент Шези 0,5/с	Ширина водотока В, м	Глубина водотока Н, м	Скорость течения U, м	Падение по уклону, м
1. р. Идэр	73	0,00066	0,036	26,10	0	28,90	28,52	1,15	0,80	48,18
2. р. Морон	12	0,00066	0,036	46,00	0	31,33	30,32	1,53	0,99	7,92
3. р. Чулуут	27	0,00066	0,036	54,10	0	32,06	30,85	1,65	1,06	17,82
4. пос. Тосонцэнгэл	245	0,00066	0,036	56,80	0	32,28	31,01	1,70	1,08	161,7
5. р. Эг	54	0,00066	0,024	125,70	0	51,66	23,64	2,52	2,11	35,64
6. р. Хангал	192	0,00066	0,024	126,08	0	51,68	23,65	2,53	2,11	126,72
7. пос. Дзунбурэн	29	0,00057	0,024	157,98	0	53,05	26,23	2,83	2,13	16,53
8. р. Орхон	1	0,00057	0,024	260,98	0	56,24	28,05	3,63	2,56	0,57
9. г. Сухбаатар	74	0,00057	0,024	260,98	0	56,24	28,05	3,63	2,56	42,18
10. пос. Наушки	56	0,00045	0,024	260,98	0	56,24	31,57	3,63	2,27	25,2
11. р. Джида	20	0,00045	0,024	318,18	0,0350	57,55	32,42	4,01	2,45	9
12. р. Темник	41	0,00045	0,024	346,50	0	58,12	32,79	4,19	2,52	18,45
13. р. Чикой	12	0,00045	0,024	631,42	0	62,32	35,53	5,65	3,14	5,4
14. пос. Новоселенгинск	31	0,00032	0,024	630,86	12,4050	62,31	42,13	5,65	2,65	9,92
15. р. Хиллок	34	0,00032	0,024	729,76	0	63,38	42,96	6,08	2,80	10,88
16. р. Кутунка	52	0,00021	0,024	730,11	0	63,38	53,03	6,08	2,26	10,92
17. 2 км выше г. Улан-Удэ	2	0,00021	0,024	770,41	0	63,78	53,41	6,25	2,31	0,42
18. р. Уда	2	0,00021	0,024	838,71	0	64,41	54,02	6,52	2,38	0,42
19. 1 км ниже г. Улан-Удэ	25	0,00021	0,024	839,50	0,8780	64,42	54,03	6,52	2,38	5,25
20. рзд Мостовой	60	0,00021	0,024	839,50	0	64,42	54,03	6,52	2,38	12,6
21. 23 км выше с. Кабанск	3,8	0,00015	0,024	848,50	0,0440	64,50	64,02	6,55	2,02	0,57
22. 19,5 км выше с. Кабанск	20,2	0,00015	0,024	848,54	0,0410	64,50	64,02	6,55	2,02	3,03
23. с. Кабанск	18	0,00010	0,024	848,50	0	64,50	78,41	6,55	1,65	1,8
24. с. Мурзино	25	0,00010	0,024	848,50	0	64,50	78,41	6,55	1,65	2,5

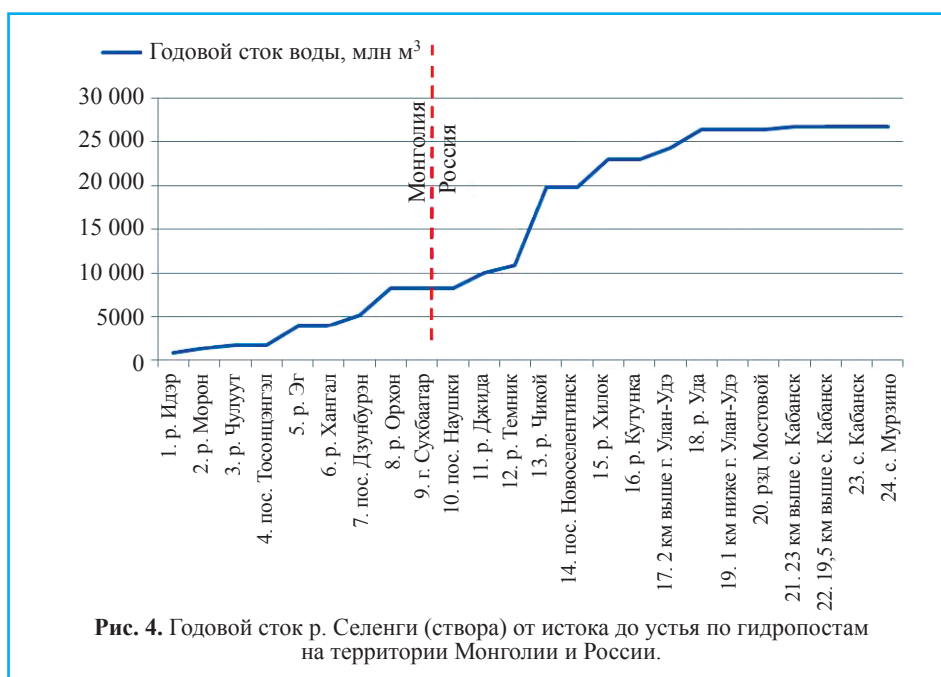


Рис. 4. Годовой сток р. Селенги (створа) от истока до устья по гидропостам на территории Монголии и России.

Суммарный расход считается из графы «Расход воды в реке». Скорость течения рассчитывается по формуле

$$V = C\sqrt{Hi}, \quad (7)$$

где C – коэффициент Шези; H – средняя глубина; i – уклон [4].

На основе 9 статьи табл. 5 построен график годового стока р. Селенги от истока (р. Идэр) до устья в 2012 г. (рис. 4).

Гидрохимическая (материальная) часть модели выражена потоками вещества в речном водотоке. Баланс массотоков по сути является водохозяйственным балансом, в котором каждый расход воды умножен на соответствующую концентрацию из базы данных. Как и водохозяйственный баланс, баланс массотоков описывается следующим уравнением:

$$G_i = G_{i-1} + \sum_k GR_{ik} + \sum_l GP_{il} - \sum_m GZ_{im}, \quad (8)$$

где G_i – перенос ЗВ в i -й вершине (створе);

GR_{ik} – привнос ЗВ с k -м притоком, поступающего на участке реки между $(i-1)$ -й и i -й вершинами;

GP_{il} – годовые сбросы ЗВ l -го предприятия на участке реки между $(i-1)$ -й и i -й вершинами;

GZ_{im} – забор ЗВ с водой m -ми предприятиями на участке реки между $(i-1)$ -й и i -й вершинами.

В гидрохимической части модели расчет проведен за 2012 г. по всем основным химическим веществам – загрязнителям р. Селенги: БПК₅, ХПК, азоту аммония, азоту нитритному, азоту нитратному, фосфору фосфатов, нефтепродуктам, фенолу, СПАВу, меди, железу, цинку. В табл. 7 приведен расчет перемещения массотока БПК₅ по створам и поступление его в р. Селенгу.

На рис. 5 показан график переноса БПК₅ по створам р. Селенги и основные пути поступления его в реку. На графике видно, что поступление объема БПК₅ с монгольского участка реки значительно меньше, чем в устье р. Селенги. Основным источником привноса БПК₅ в створ р. Селенги является р. Чикой, откуда поступило 17,8 тыс. т, в то время как с монгольской части реки в 2,4 раза меньше (7,5 тыс. т). Также значительный вклад в загрязнение вносит р. Хилок. В 2012 г. с ее водами в р. Селенгу поступило 5,8 тыс. т БПК₅. В этом же году с реками Джиды и Уда в Селенгу внесено по 3,2 тыс. т. Главным источником антропогенного воздействия является Селенгинский промышленный узел, с территории которого в Селенгу поступило 4,7 тыс. т БПК₅. По результатам модельных расчетов в оз. Байкал (гидропост в устье р. Селенги – с. Мурзино) в 2012 г. поступило 46 тыс. т этого загрязняющего вещества.

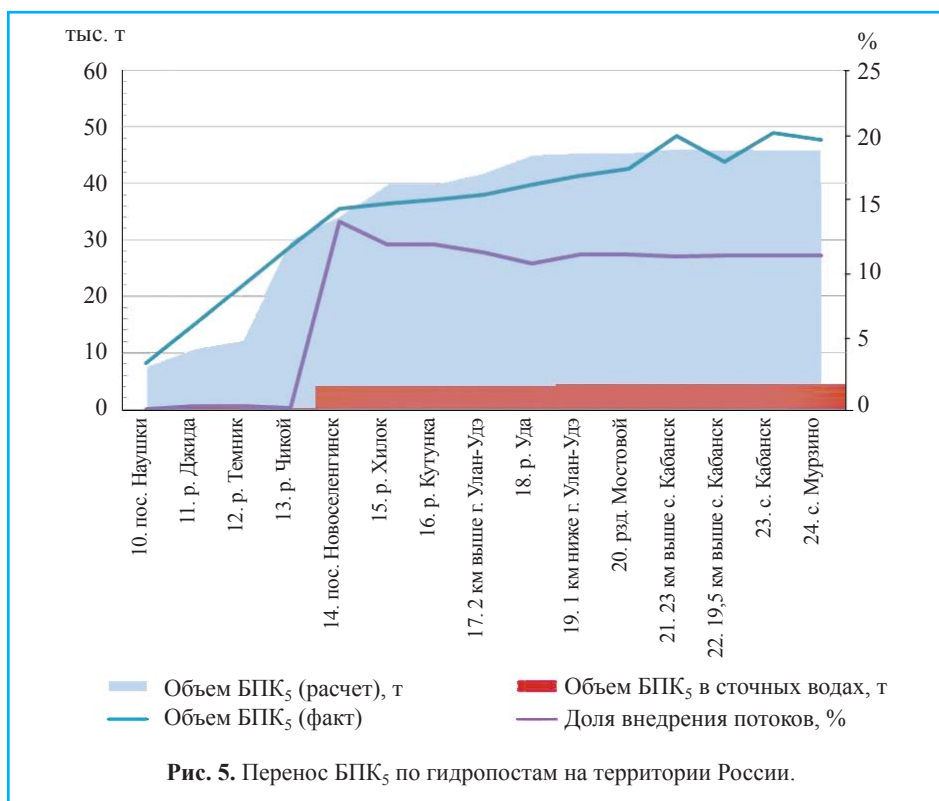


Таблица 7. Расчет по модели переноса БПК₅ в 2012 г., т

Створ	Поток в притоке	Итог притоков	Поток попутных	Итог попутных	Поток внедрения	Итог внедрения	Изяятие потока	Итог изъятия	Всего в створе	Средний фон	Плотность в створе	Доля внедрения потоков	Фон в створе
	Ст. 1	Ст. 2	Ст. 3	Ст. 4	Ст. 5	Ст. 6	Ст. 7	Ст. 8	Ст. 9	мг/л	мг/л	%	мг/л
10. пос. Наушки	7543,8	7543,8	0	0	0	0	0	0	7543,8	0,92	1,54	0,00	0,92
11. р. Джида	3216,516	10 760,32	0	0	27,684	27,684	0	0	10788	1,08	2,41	0,26	1,21
12. р. Темник	1466,85	12 227,17	0	0	0	27,684	0	0	12 254,85	1,12	2,23	0,23	1,17
13. р. Чикой	17810,5	30 037,67	0	0	0	27,684	0	0	30 065,35	1,51	2,85	0,09	1,73
14. пос. Новоселенгинск	0	30 037,67	0	0	4694,4	4722,084	731,573	731,573	34 028,18	1,71	12,96	13,88	1,92
15. р. Хилок	5772,306	35 809,97	0	0	122,604	4844,688	0	731,573	39 923,09	1,74	2,77	12,14	1,76
16. р. Кутунка	25,19	35 835,16	0	0	0	4844,688	0	731,573	39 948,28	1,74	3,16	12,13	1,74
17. 2 км выше г. Улан-Удэ	0	35 835,16	2038,92	2038,92	0	4844,688	9,672	741,245	41 977,53	1,73	1,73	11,54	1,73
18. р. Уда	3187,692	39 022,85	0	2038,92	0,228	4844,916	0	741,245	45 165,45	1,71	2,32	10,73	1,69
19. 1 км ниже г. Улан-Удэ	0	39 022,85	0	2038,92	332,4	5177,316	4,396	745,641	45 493,45	1,72	12,87	11,38	1,73
20. разъезд Мостовой	0	39 022,85	0	2038,92	0	5177,316	0,322	745,963	45 493,13	1,72	1,72	11,38	1,72
21. 23 км выше с. Кабанск	0	39 022,85	514,04	2552,96	16,8	5194,116	2,172	748,135	46 021,8	1,72	12,86	11,29	1,72
22. 19,5 км выше с. Кабанск	0	39 022,85	0	2552,96	15,6	5209,716	0	748,135	46 037,4	1,72	12,86	11,32	1,72
23. с. Кабанск	0	39 022,85	0	2552,96	0	5209,716	2,562	750,697	46 034,83	1,72	1,72	11,32	1,72
24. с. Мурзино	0	39 022,85	0	2552,96	0	5209,716	0	750,697	46 034,83	1,72	1,72	11,32	1,72

Сравнение данных моделирования и данных, рассчитанных ранее по методике РД 52.24.748-2010, показало, что они в значительной степени совпадают. По результатам моделирования переноса загрязняющих веществ со стоком р. Селенги была проведена оценка объема поступления ЗВ с территории монгольской части бассейна.

На основе расчета переноса химических веществ по р. Селенге можно сделать следующие выводы. С территории монгольской части бассейна реки поступает около 30 % общего стока, 70 % общего стока р. Селенги формируется на территории России. Соответственно и вынос химических веществ в р. Селенгу происходит преимущественно на территории России. В 2012 г. в приграничном створе реки в пос. Наушки было зафиксировано около 7 млрд м³ годового стока, а в створе в устье реки (с. Мурзино) 23,9 млрд м³. Крупными притоками р. Селенги являются реки Чикой (9 млрд м³), Хилок (3,1 млрд м³), Орхон (3,1 млрд м³), Уда (2,1 млрд м³), Эг (2,1 млрд м³), Джида (1,8 млрд м³).

Основная доля привноса загрязняющих веществ в р. Селенгу приходится на территорию российской части бассейна. Поступление с территории Монголии от общей массы ЗВ, поступивших в оз. Байкал, составило: по азоту аммония 50 %; нефтепродуктам 39 %; меди 34 %; железу 32 %; фосфору фосфатов 32 %; азоту нитритному 10,4 %; азоту нитратному 14,4 %; БПК₅ 16,4 % (табл. 8).

Таблица 8. Структура поступления загрязняющих веществ в р. Селенгу и оз. Байкал в 2012 г.

Загрязняющее вещество	Поступление ЗВ с территории Монголии (пос. Наушки)		Поступление ЗВ на территории России с притоками и сточными водами предприятий		Поступление ЗВ со стоком р. Селенги в оз. Байкал (с. Мурзино)	
	т	%	т	%	т	%
БПК ₅	7544	16,4	38 491	83,6	46 035	100
ХПК	107 709	25,0	323 970	75,0	431 679	100
Азот аммония	307	50,1	306	49,9	613	100
Азот нитритный	16	10,4	138	89,6	154	100
Азот нитратный	740	14,4	4383	85,6	5123	100
Фосфор фосфатов	98	31,9	209	68,1	307	100
Нефтепродукты	140	39,0	219	61,0	359	100
Фенолы	6,3	21,3	23,3	78,7	29,6	100
Медь	19,6	33,8	38,4	66,2	58	100
Железо	3981	31,8	8547	68,2	12 528	100
Марганец	349	27,9	903	72,1	1252	100
Цинк	80	25,7	231	74,3	311	100
СПАВ	70	24,2	219	75,8	289	100

Наибольший объем загрязняющих веществ в р. Селенгу вносится с притоками Чикой и Хилок. В 2012 г. доля ЗВ, поступивших со стоком реки Чикой в Селенгу, а затем в оз. Байкал составила по БПК₅ 38,7 %; ХПК 37,4 %; нефтепродуктам 20 %; фенолам 39,3 %; меди 36,7 %; железу 37,9 %; марганцу 35,7 %; цинку 36,6 %; СПАВ 31 %. Со стоком р. Хилок в Селенгу внесено 21,6 % СПАВ; 16 % ХПК; 15,9 % железа; 13,6 % фенолов; 13,1 % цинка. Со стоком р. Уды поступило 13,2 % нефтепродуктов и 10,9 % фенолов; со стоком р. Джиды 16 % нефтепродуктов от общего объема поступления ЗВ в оз. Байкал.

Активно загрязняет воды Селенги Улан-Удэнский промышленный узел, расположенный в 152 км от устья реки. Наибольшие объемы сброса загрязняющих веществ со сточными водами производят предприятия жилищно-коммунального хозяйства. ОАО «Водоканал» аккумулирует сточные воды не только жилого комплекса, но и многих промышленных предприятий г. Улан-Удэ. Между тем очистные сооружения предприятия не рассчитаны на очистку промышленных стоков, а износ оборудования достигает 70 %. В 2012 г. ОАО «Водоканал» сбросил в р. Селенгу 116 т азота аммония; 98,4 т азота нитритного; 2886 т азота нитратного; 97,1 т фосфора фосфатного, что составляет 19, 64, 56, 31,6 % соответственно от общего объема загрязняющих веществ, поступившего в оз. Байкал.

Другими крупными загрязнителями являются предприятия жилищно-коммунального комплекса пос. Селенгинска, г. Гусиноозерска и г. Кяхты, а также промышленные предприятия – ОАО «Разрез Тугнуйский» и Гусиноозерская ГРЭС.

По данным проведенного моделирования выявлена прямая зависимость между изменением стока реки (см. рис. 5) и объемами переноса загрязняющих веществ по ее длине, свидетельствующая о том, что либо часть загрязнения имеет природный характер, обусловленный строением бассейна реки на монгольской и российской территориях, либо существуют источники загрязнения, оставленные за границами государственного мониторинга качества вод. Например, сопоставление показателей по загрязнению нефтепродуктами показало, что по данным официальной статистики «2-ТП Водхоз» на территории бассейна р. Селенги предприятиями было сброшено 2,68 т нефти, в то время как по нашим расчетам со стоком р. Селенги в оз. Байкал поступило 140 т нефтепродуктов, из которых половина привнесена с монгольской части территории бассейна. Полученные данные свидетельствуют о необходимости дальнейших исследований причин и источников загрязнения на территории трансграничной р. Селенги, а также решения комплекса проблем, связанных с ухудшением качества байкальских вод.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гидрологический режим рек бассейна р. Селенги и методы его расчета / под ред. В.А. Семенова и Б. Мягмаржаева. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 235 с.
2. Зоимова Э.М. Современное состояние и проблемы управления использованием и охраной водных ресурсов бассейна р. Селенги // Проблемы теории и практики управления. 2011. № 8. С. 108–117.
3. РД 52.24.748-2010. Руководящий документ. Усовершенствованная методика определения выноса (переноса) загрязняющих веществ с речным стоком (утв. Росгидрометом 11.11.2010).
4. Знаменский В.А. Модель антропогенной нагрузки на реку и формирования качества воды в реке // Программные системы: теория и приложения. 2010. № 2. С. 15–38.
5. Знаменский В.А. Предельно допустимый расход массы вещества в сточных водах: метод. пособие. Красноярск: Центр информации, 2011. 112 с.

Сведения об авторах:

Зоимова Эржени Михайловна, канд. экон. наук, старший научный сотрудник, лаборатория региональных экономических систем, Байкальский институт природопользования СО РАН, Республика Бурятия, 670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, д. 8; e-mail: zomerg@mail.ru

Гомбоев Баир Октябрьевич, д-р геогр. наук, главный научный сотрудник, лаборатория региональных экономических систем, Байкальский институт природопользования СО РАН, Республика Бурятия, 670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, д. 8; e-mail: zomerg@mail.ru

Зандакова Арюна Баировна, инженер, лаборатория региональных экономических систем, Байкальский институт природопользования СО РАН, Республика Бурятия, 670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, д. 8; e-mail: gyushaz@yandex.ru