

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ
М.В. ЛОМОНОСОВА
ГЕОГРАФИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

Итоговый отчет по проекту

GPSO/LakeBaikal/085/01SMar2015_MSU] Predictive assessment of long-term changes of water balance in the basin of transboundary Selenga river in terms of climatic fluctuations and changes of the characteristics of water use (“Прогнозная оценка долгопериодных изменений водного баланса в бассейне трансграничной реки Селенга в условиях климатических флуктуаций и изменения характеристик водопользования”)
(ПРОЕКТ ПРООН/ГЭФ «Комплексное управление природными ресурсами трансграничной экосистемы бассейна Байкала»)

Утверждаю

И.о. декана

географического факультета МГУ

Член-корр. РАН С.А. Добролюбов

Руководитель

К.Г.Н

С.Р. Чалов

МОСКВА 2015

СПИСОК ОСНОВНЫХ ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Организация-Исполнитель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» (географический факультет Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова)

Руководитель работ:

кандидат географических наук, без ученого звания

подпись, дата

Чалов С.Р.

Исполнители

академик РАН, проф., доктор географических наук

подпись, дата

Касимов Н.С.

профессор, доктор географических наук

подпись, дата

Эдельштейн К.К.

кандидат географических наук, доцент

подпись, дата

Косицкий А.Г.

кандидат географических наук, без ученого звания

подпись, дата

Морейдо В.М.

без ученой степени, без ученого звания

подпись, дата

Романченко А.О.

кандидат географических наук, без ученого звания

подпись, дата

Ярсо Еркер

кандидат географических наук, без ученого звания

подпись, дата

Константинов П.И.

Оглавление

| | |
|--|-----------|
| Введение | 5 |
| Глава 1. Оценка водного баланса озера Байкал и балансов отдельных котловин | 7 |
| 1.1 Характеристика используемых материалов и методы оценки водного баланса бассейна озера Байкал | 7 |
| 1.2. Осадки | 9 |
| 1.3. Поверхностный приток..... | 15 |
| 1.4. Подземный приток | 27 |
| 1.5. Испарение | 29 |
| 1.6. Интегральная оценка водного баланса озера Байкал | 30 |
| Глава 2. Оценка трендов в многолетнем цикле водного баланса бассейна реки Селенга | 31 |
| 2.1. Оценка изменений водообеспеченности территории бассейна р. Селенга глобальной гидрологической модели WaterGAP3 | 37 |
| Глава 3. Прогноз изменений гидрологического режима рек бассейна Селенги в связи с антропогенным воздействием в XXI веке | 40 |
| 3.1. Исходные данные для прогнозных оценок антропогенного воздействия в пределах бассейна Селенги | 40 |
| 3.2. Оценка перспективных изменений водного режима р. Селенги в результате строительства ГЭС | 44 |
| 3.2.1. Потенциальное изменение стока воды водохранилищем Чаргайт | 46 |
| 3.2.2. Потенциальное изменение стока воды водохранилищем Эгийн | 47 |
| 3.2.3. Потенциальное изменение стока воды водохранилищем Орхон | 49 |
| 3.2.4. Потенциальное изменение стока воды водохранилищем Шурэн | 50 |
| 3.3. Влияние антропогенной нагрузки на мезо-климатические особенности бассейна реки Селенги (путем регионального моделирования) | 53 |
| Глава 4. Разработка инструментария для проведения комплексных оценок изменений гидрологического режима рек бассейна Селенги | 62 |
| 4.1. Разработка бассейновой модели формирования стока Ecomag для бассейна р. Селенга | 62 |
| 4.2. Обоснование критических уровней изменения гидрологического рек | |



| | |
|---|----|
| бассейна реки Селенга для моделирования реакции русловой сети на антропогенные нарушения..... | 67 |
| Заключение | 74 |
| Литература | 77 |

Введение

Данный отчет подготовлен в качестве промежуточного по проекту “Прогнозная оценка долгопериодных изменений водного баланса в бассейне трансграничной реки Селенга в условиях климатических флуктуаций и изменения характеристик водопользования)”, реализуемого в рамках программы ПРООН-ГЭФ «Комплексное управление водными ресурсами трансграничной экосистемы бассейна Байкала». Конечной целью проекта является разработка оценок ожидаемых изменений водного баланса в связи с реализацией различных хозяйственных программ в Монголии и республики Бурятия.

В результате выполнения работы получены следующие научно-методические результаты:

- оценка трендов изменения водного баланса бассейна реки Селенга и озера Байкал;
- оценка современного и перспективного (прогноз в 20-, 30- и 50-летней перспективе) водного баланса реки Селенга при разных гидроклиматических сценариях и сценариях техногенного воздействия (от минимального до максимального);
- прогнозная оценка влияния гидротехнического строительства на территории Монголии на изменение объема и режима стока р. Селенги и сценарная генерация прогнозных гидрографов стока;
- оценка будущего влияния антропогенной нагрузки на мезо-климатические особенности бассейна реки Селенги (путем регионального моделирования COSMO-CLM)

В рамках выполнения проекта подготовлена сконфигурированная модель водного баланса реки Селенга (на базе программного комплекса EcoMAG), проведены и представлены в отчете примеры калибровки и верификации модели. Использование модели регулируется авторским правом (разработчик модели — Мотовилов Ю.Г.) и для ее открытого использования (в том числе Байкальским Информационным Центром) необходимо заключение лицензионного соглашения

Аналитический отчет и картографические материалы могут быть размещены на веб-сайте Байкальского информационного центра, других информационных ресурсов Монголии и России.

Отчет подготовлен специалистами географического факультета МГУ, Института Водных проблем РАН и университета Стокгольма (Швеция). При подготовке отчета



использованы материалы института географии СО РАН (Россия) и Лимнологического института СО РАН (Россия), Гельмгольц-центра по окружающей среде (Германия).

Глава 1. Оценка водного баланса озера Байкал и балансов отдельных котловин

1.1. Характеристика используемых материалов и методы оценки водного баланса бассейна озера Байкал

Водный баланс — свойство любого объекта, основанное на фундаментальном законе физики — «законе сохранения вещества». Суть его заключается в том, что количество воды, поступающее в водный или любой другой, имеющий четкие границы объект за произвольный промежуток времени T , за вычетом количества воды, уходящего из данного объекта за тот же промежуток времени, равно изменению запасов воды в данном объекте за период времени T . Водный баланс может быть составлен абсолютно для любого объекта: участка реки, речного бассейна, водоема, субъекта РФ, государства, континента и т.д. Уравнения водного баланса будут иметь разную форму, в зависимости от того, какой объект рассматривается, так как каждый конкретный объект имеет разные компоненты приходной и расходной составляющей водного баланса.

Уравнение водного баланса озера Байкал, равно как и любого другого водоема, имеет вид:

$$X + Y_p + Y_n - Z - Y_c = \Delta V, \quad (1.1)$$

где X — осадки, выпадающие на поверхность озера за период времени T ;

Y_p — поверхностный приток воды в озеро с водосбора за период времени T ;

Y_n — подземный приток воды в озеро за период времени T ;

Z — испарение с поверхности озера за период времени T ;

Y_c — сток воды из озера за период времени T ;

ΔV — изменения объема озера за период времени T .

Если $\Delta V > 0$, значит за период времени T приходные составляющие водного баланса больше расходных, следовательно объем озера увеличился. Напротив, если $\Delta V < 0$, то это означает, что расходные составляющие за данный промежуток времени больше приходных, следовательно объем воды в озере уменьшился. И, наконец, если $\Delta V = 0$, то приходные составляющие за период T равны расходным и объем не изменился.

Уравнение (1.1) предполагает объемные единицы измерения: л, м³ или даже км³. Если все составляющие уравнения водного баланса поделить на площадь озера, то получатся линейные единицы измерения (мм, м, км). В этом случае правая часть уравнения (1.1) будет соответствовать изменению уровня озера за период T .

В качестве T можно рассматривать любой промежуток времени. При оценке составляющих водного баланса под T чаще всего подразумевается месяц, сезон или год. Как правило, если брать в качестве T многогодные месяцы, сезоны или годы, то будет соблюдаться условие $\Delta V > 0$, поскольку в многогодный период обычно происходит наполнение водоема. Напротив, если рассматривать маловодный месяц, сезон или год, то скорее будет выполняться условие $\Delta V < 0$ и, соответственно, будет происходить сработка водоема. Если общий объем водоема и, соответственно, уровень воды в нем не испытывает многолетнего тренда, то при использовании годовых составляющих уравнения (1.1), осредненных за многолетний период, величина ΔV будет стремиться к нулю. Таким образом, уравнение водного баланса озера за многолетний период примет вид:

$$X + Y_p + Y_n = Z + Y_c \quad (1.2)$$

Озеро Байкал состоит из трех основных котловин: Северной, Средней и Южной. Границы между котловинами установлены в соответствии с Приказом Минприроды России от 05.03.2010 №63: Граница между Северной и Средней котловинами: восточный берег 53°52'351 СШ, 109°08'600 ВД; западный берег 53°46'512 СШ, 107°58'773 ВД. Граница между Средней и Южной котловинами: восточный берег 52°17'575 СШ, 106°06'940 ВД; западный берег 52°14'907 СШ, 105°42'850 ВД. Уравнение водного баланса для Северной (уравнение (1.3)), Средней (1.4) и Южной (1.5) котловин следующие:

$$X_1 + Y_{p1} + Y_{n1} = Z_1 + Y_{1-2}, \quad (1.3)$$

$$X_2 + Y_{p2} + Y_{n2} + Y_{1-2} = Z_2 + Y_{2-3}, \quad (1.4)$$

$$X_3 + Y_{p3} + Y_{n3} + Y_{2-3} = Z_3 + Y_c, \quad (1.5)$$

где индексы 1, 2, 3 означают, соответственно, Северную, Среднюю и Южную котловины; Y_{1-2} — переток воды из Северной в Среднюю котловину, Y_{2-3} — переток воды из Средней в Южную котловину.

Изучением элементов водного баланса бассейна оз. Байкал активно занимаются с 1960-х годов. В настоящее время опубликованы материалы по годовому водному балансу притоков р. Селенги (Афанасьев, 1976. Водные ресурсы... 1967; Семенов, Магмаржав,

1977; 1987; Sinyukovich, 2008). В данном разделе приводится сопоставление данных из опубликованных источников и материалы оценок составляющих годового водного баланса данной территории, полученных авторами результатов при обработке данных многолетних наблюдений на метеорологических станциях с помощью программы New LocClim, разработанной Продовольственной и сельскохозяйственной организацией Объединенных наций (FAO) совместно с Немецкой службой погоды (DWD) (Grieser, Gommers, 2006). Используются актуализированные материалы гидрологических справочников (до 2014 года), проводившихся ранее гидрологических и геологических изысканий, данных центра мониторинга подземных вод, опубликованных научных данных и результатов полевых (экспериментальных) исследований.

1.2. Осадки

Для оценки водного баланса озера Байкал проведена оценка данных о количестве осадков на поверхность озера Байкал и на территорию бассейна. Для оценки количества осадков, выпадающих на поверхность озера, использованы данные наблюдений метеостанций, расположенных вблизи от акватории озера (рисунок 1.1). Используются данные, опубликованные на официальном сайте Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации — мирового центра данных. Для соблюдения однородности все величины водного баланса осреднялись за период после 1962 г., то есть после заполнения Иркутского водохранилища. По данным этот период является вполне репрезентативным с точки зрения всех составляющих водного баланса. Данные об осадках на этих метеостанциях представлены в таблице 1.1.

Межгодовая изменчивость осадков невелика, коэффициенты вариации для большинства метеостанций не превышают 0,2. Исключение составляет метеостанция Большой Ушканий остров, где коэффициент вариации равен 0,27.

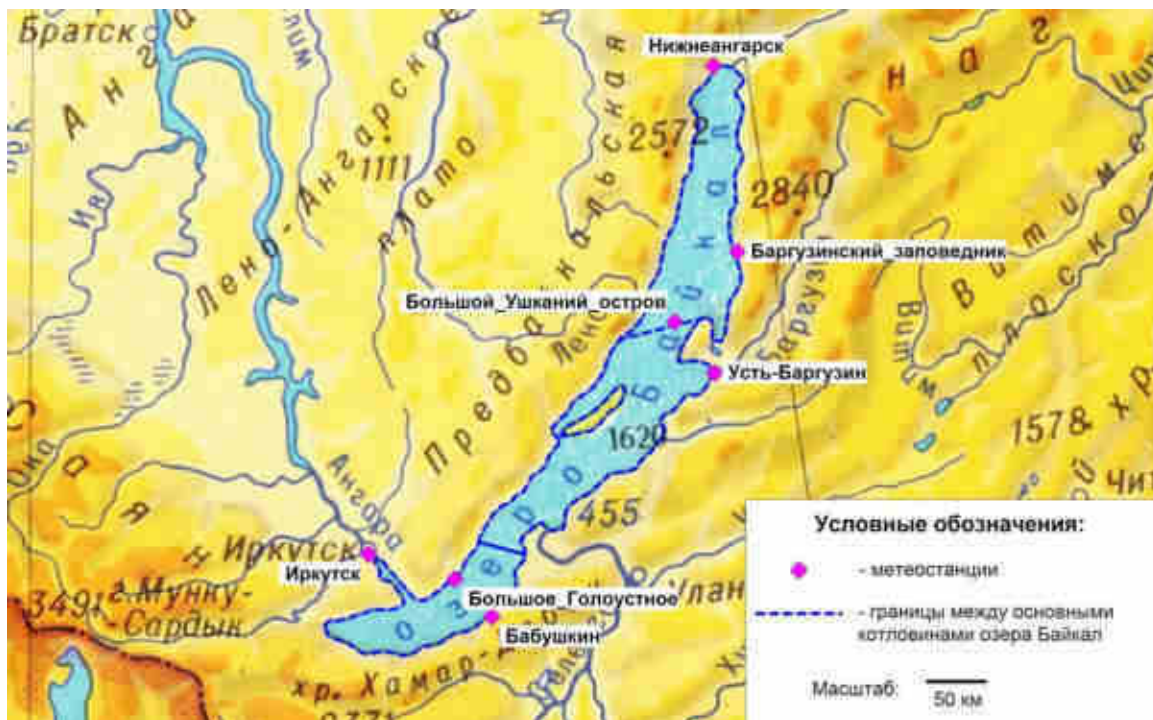


Рисунок 1.1. Схема расположения метеостанций

Таблица 1.1. Годовая сумма осадков

| Метеостанция | Период осреднения | Среднее значение, мм | Максимум, мм | Минимум, мм | Коэффициент вариации |
|-------------------------|--|----------------------|--------------|-------------|----------------------|
| Нижнеангарск | 1962–1964; 1966–1969; 1971–2013 | 353 | 496 | 229 | 0,19 |
| Баргузинский заповедник | 1962–1964; 1966–1967; 1970–1971; 1973, 1975–1991; 1996–2007; 2009–2012 | 428 | 563 | 304 | 0,14 |
| Большой Ушканый остров | 1962–1968; 1970; 1972; 1974–1984; 1986–2013 | 244 | 452 | 144 | 0,27 |
| Усть-Баргузин | 1962–1964; 1973–1974; 1977–1991; 1993–2013 | 365 | 565 | 204 | 0,21 |
| Иркутск | 1962–2013 | 468 | 637 | 320 | 0,17 |
| Большое Голоустное | 1962–1971; 1973–1981; 1983–1996; 1998–2001; 2003–2004; 2006–2013 | 264 | 403 | 133 | 0,22 |
| Бабушкин | 1962–1973; 1975–2013 | 528 | 721 | 372 | 0,16 |

Средние значения годовой суммы осадков меняются более чем вдвое: от 244 мм для Большого Ушканьего острова до 528 мм для г. Бабушкин. В целом, прослеживается

увеличение осадков с севера на юг. Другая закономерность — значительно большее количество осадков восточного побережья Байкала по сравнению с западным. Так среднее годовое количество осадков, выпадающее на метеостанции Большое Голоустное (264 мм), ровно в два раза меньше, чем на метеостанции г. Бабушкин (528 мм), несмотря на то, что эти метеостанции расположены всего в 40 км друг от друга.

Скоррелированность осадков по разным метеостанциям относительно невысокая (таблица 1.2). Наиболее высокие коэффициенты корреляции соответствуют метеостанциям, близко расположенным друг к другу. Чем дальше удалены метеостанции, тем меньше между ними коэффициент корреляции годовых сумм осадков. Однако, следует подчеркнуть, что ни для одной пары метеостанций не наблюдается отрицательного коэффициента корреляции, следовательно противофазы выпадения осадков здесь отсутствуют. Кроме того, почти для всех пар метеостанций коэффициент корреляции превышает 0,3. Исключение составляет пара наиболее удаленных друг от друга метеостанций: Нижнеангарск — Бабушкин. Многолетних трендов изменения годового количества осадков не наблюдается (рисунок 1.2).

Таблица 1.2. Корреляционная матрица годовой суммы осадков

| Метеостанции | Нижне-ангарск | Баргузинский заповедник | Большой Ушканий остров | Усть-Баргузин | Иркутск | Большое Голоустное | Бабушкин |
|-------------------------|---------------|-------------------------|------------------------|---------------|---------|--------------------|----------|
| Нижнеангарск | 1 | 0,32 | 0,33 | 0,33 | 0,32 | 0,36 | 0,09 |
| Баргузинский заповедник | 0,32 | 1 | 0,44 | 0,63 | 0,33 | 0,43 | 0,33 |
| Большой Ушканий остров | 0,33 | 0,44 | 1 | 0,74 | 0,40 | 0,30 | 0,33 |
| Усть-Баргузин | 0,33 | 0,63 | 0,74 | 1 | 0,40 | 0,48 | 0,45 |
| Иркутск | 0,32 | 0,33 | 0,40 | 0,40 | 1 | 0,70 | 0,62 |
| Большое Голоустное | 0,36 | 0,43 | 0,30 | 0,48 | 0,70 | 1 | 0,62 |
| Бабушкин | 0,09 | 0,33 | 0,33 | 0,45 | 0,62 | 0,62 | 1 |

По полученным данным построена карта среднего годового слоя осадков на поверхность озера Байкал (рисунок 1.3). С ее помощью рассчитано среднее годовое количество осадков, выпадаемое над каждой из котловин озера Байкал. С учетом площадей поверхности котловин, определены средние ежегодные объемы осадков, выпадаемых над ними. Результаты представлены в таблице 1.3. Общее годовое количество

осадков получилось равно $10,4 \text{ км}^3$ при слое 330 мм, что несколько меньше по сравнению с оценками, полученными В.Н. Синюковичем.

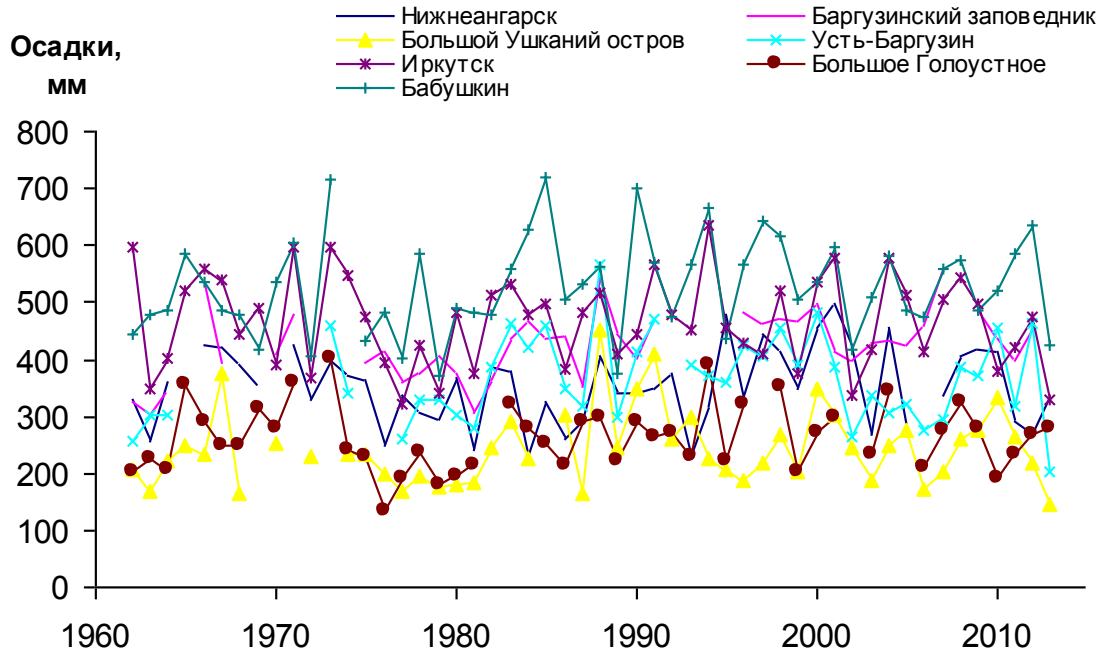


Рисунок 1.2. Многолетние колебания годового количества осадков



Рисунок 1.3. Средняя годовая сумма осадков по данным наблюдений на метеостанциях с 1962 по 2013 гг.

Таблица 1.3. Годовое количество осадков, выпадаемое на поверхность озера Байкал

| Котловина | Площадь поверхности, км ² | Осадки, мм | Осадки, км ³ |
|----------------|--------------------------------------|------------|-------------------------|
| Северная | 11300 | 326 | 3,70 |
| Средняя | 13000 | 293 | 3,83 |
| Южная | 7110 | 403 | 2,87 |
| Байкал в целом | 31500 | 330 | 10,4 |

В течение года осадки распределены неравномерно. Большая их часть выпадает с июня по сентябрь. На некоторых метеостанциях наблюдается небольшое увеличение осадков в ноябре и декабре (таблица 1.4).

Таблица 1.4. Внутригодовое распределение осадков, %

| Метеостанция / Месяц | я | ф | м | а | м | и | и | а | с | о | н | д |
|----------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|-----|----------|------|
| Нижнеангарск | 4,5 | 3,8 | 3,1 | 5,2 | 7,7 | 11,1 | 17,0 | 18,4 | 12,1 | 8,3 | 5,4 | 3,4 |
| Баргузинский заповедник | 2,5 | 1,4 | 2,0 | 4,4 | 7,6 | 10,0 | 16,0 | 14,1 | 13,4 | 8,6 | 10, 4 | 9,6 |
| Большой Ушканий остров | 1,6 | 1,0 | 0,9 | 2,1 | 6,5 | 13,3 | 22,7 | 19,6 | 10,4 | 3,4 | 8,1 | 10,4 |
| Усть-Баргузин | 3,1 | 1,3 | 1,5 | 3,6 | 5,9 | 10,8 | 20,8 | 16,8 | 10,5 | 6,3 | 9,4 | 10,1 |
| Иркутск | 2,7 | 1,8 | 2,5 | 4,4 | 7,2 | 14,3 | 24,4 | 18,9 | 10,7 | 5,3 | 4,1 | 3,8 |
| Большое Голоустное | 1,0 | 1,0 | 1,4 | 3,9 | 7,7 | 18,1 | 25,6 | 23,0 | 12,3 | 2,3 | 1,8 | 1,6 |
| Бабушкин | 3,2 | 1,6 | 2,2 | 4,7 | 7,5 | 13,3 | 20,5 | 18,9 | 12,4 | 5,4 | 5,2 | 5,2 |

Распределение осадков по территории бассейна озера Байкал соответствует физико-географическому районированию. Вся южная часть водосбора, приуроченная к зоне Центральноазиатских пустынь, характеризуется низкими годовыми суммами осадков, от 80 до 200 мм/год (рисунок 1.4). Одновременно, это наиболее засушливая часть водосбора, с самыми высокими (до 2°C) среднегодовыми температурами воздуха (рисунок 1.5), и самой высокой среднегодовой испаряемостью (до 800 мм). Расположенная следом на север зона южно-сибирских гор получает от 250 до 400 мм/год. Наконец, самая северная часть бассейна, расположенная в Байкало-Джугджурской горно-таежной зоне, характеризуется самыми высокими в бассейне годовыми суммами осадков — до 500 мм/год.

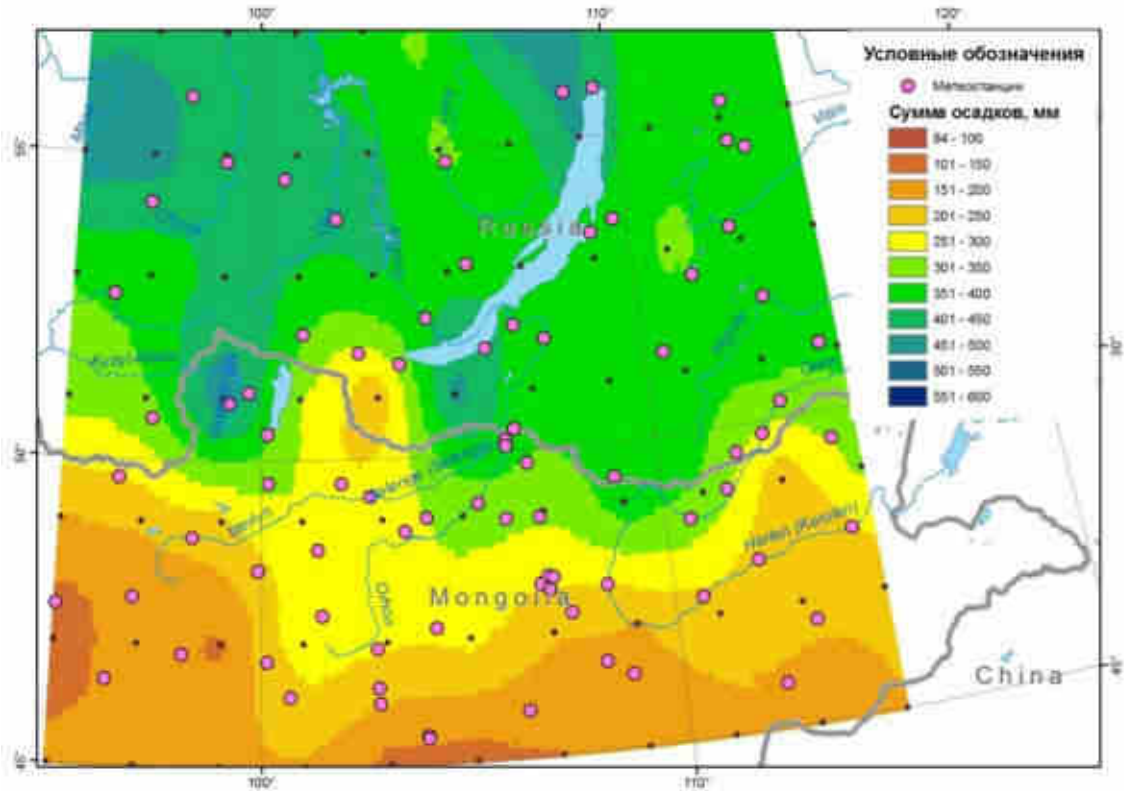


Рисунок 1.4. Средняя многолетняя среднегодовая сумма осадков, мм

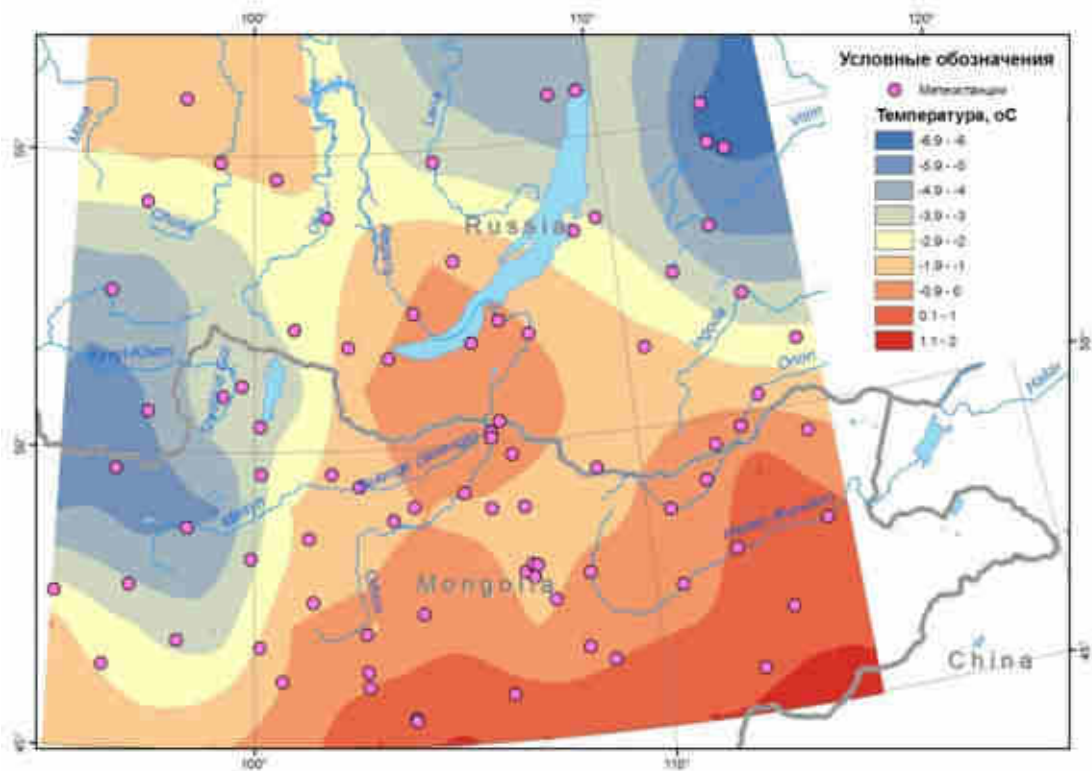


Рисунок 1.5. Средняя многолетняя среднегодовая температура воздуха, °C

В настоящее время в данном районе отмечается тенденция к уменьшению годовых региональных сумм осадков. Так, за весь период наблюдений отмечен среднегодовой тренд уменьшения осадков до 2,5 мм/год для м/с Кабанск, что соответствует величине изменений около 50 мм за весь 106-летний период наблюдений. Осредненные данные по 41 метеорологической станции в бассейне Селенги за период с 1995 по 2013 годы показывают снижение годовой суммы осадков на 2,7 мм (рисунок 1.6), что соответствует уменьшению суммы осадков на 0,15 мм/год.

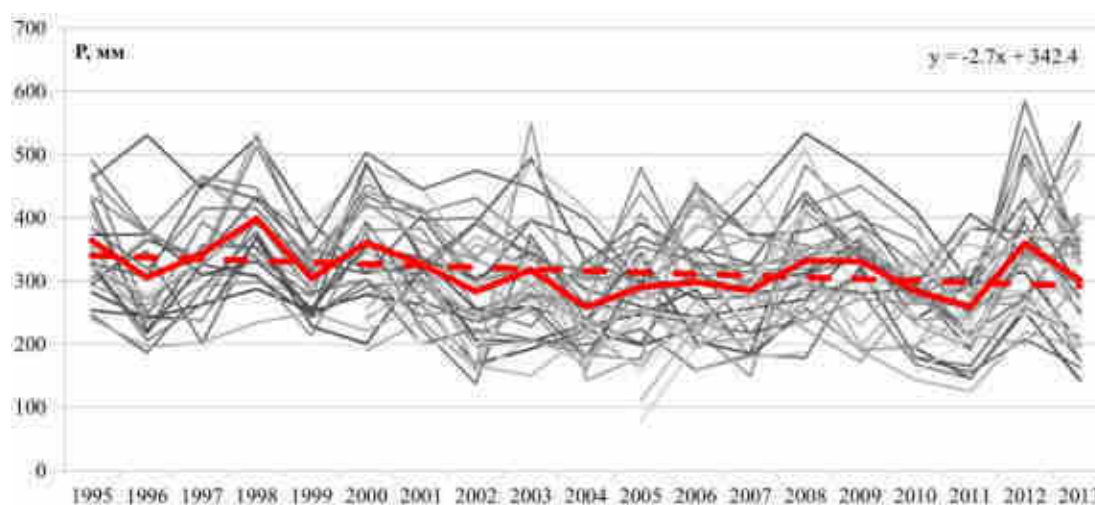


Рисунок 1.6. Среднегодовые суммы осадков на 41 станции в бассейне Селенги (российская и монгольская части). Красная сплошная линия — среднее по всем станциям, пунктирная — линейный тренд

1.3. Поверхностный приток

Основной приходной составляющей водного баланса озера Байкал является поверхностный приток воды с водосбора. Общая площадь бассейна озера Байкал (без учета площади акватории самого озера) равна 545 тыс. км². Из них 45% находится на территории Российской Федерации, а 55% — на территории Монголии (Гармаев, Христофоров, 2010). В Байкал впадает более 300 рек и ручьев. Из них лишь одна река, в соответствии с является большой, имея площадь бассейна более 50 тыс. км² — р. Селенга, бассейн которой занимает 82% всего водосбора Байкала и имеет площадь 447 тыс. км². Еще восемь рек относятся к категории средних с площадью бассейна от 2 000 до 50 000 км². Это рр. Голоустная, Тья, Кичера, Верхняя Ангара, Баргузин, Турка, Кика и Снежная. Наиболее крупные из них реки Верхняя Ангара и Баргузин, площади бассейнов

каждой из них чуть более 21 тыс. км². Остальные шесть средних рек имеют площадь бассейна менее 10 тыс. км². Все остальные реки относятся к категории малых и имеют площадь бассейна менее 2 тыс. км².

Для оценки притока воды использованы данные наблюдений на гидрологических постах рек, впадающих в озеро Байкал (рисунок 1.7, таблица 1.5). Учитывая, что большая часть бассейна Байкала находится в Монголии, часть поверхностного притока формируется на ее территории. Для выявления российской и монгольской составляющих поверхностного притока воды к озеру использованы данные российских гидрологических постов на реках, вытекающих с территории Монголии.



Рисунок 1.7. Используемые гидрологические посты на реках

Таблица 1.5. Характеристики годового стока рек в створах используемых гидрологических постов

| Река — Пост | F, км ² | Число лет | Q ₀ , м ³ /с | | Cv | | Ошибка среднего, % |
|-------------------------|--------------------|-----------|------------------------------------|---------------|------------|---------------|--------------------|
| | | | До 1995 г. | После 1996 г. | До 1995 г. | После 1996 г. | |
| Селенга — с. Кабанск | 445000 | 35 | 970 | 697 | 0,31 | 0,15 | 4,7 |
| Селенга — рзд. Мостовой | 440000 | 50 | 949 | 692 | 0,24 | 0,14 | 2,9 |

| | | | | | | | |
|--|--------|----|------|-----|------|------|-----|
| Селенга — пос. Новоселенгинск | 360000 | 49 | 753 | 526 | 0,24 | 0,13 | 3,1 |
| Селенга — пос. Наушки | 282000 | 40 | 386 | 231 | 0,43 | 0,10 | 6,3 |
| р. Желтура — с. Желтура | 5120 | 24 | 20,6 | | 0,36 | | 7,3 |
| р. Голоустная — с. Большое Голоустное | 1480 | 25 | 7,89 | | 0,42 | | 8,4 |
| р. Баргузин — пос. Баргузин | 19800 | 45 | 127 | | 0,23 | | 2,7 |
| р. Турка — с. Соболиха | 5050 | 46 | 53,8 | | 0,32 | | 4,6 |
| р. Кика — с. Хаим | 1740 | 41 | 24,5 | | 0,18 | | 2,6 |
| р. Большая Речка — ст. Посольская | 565 | 23 | 12,1 | | 0,24 | | 3,4 |
| р. Снежная — д. Выдрино | 3000 | 23 | 46,0 | | 0,22 | | 3,0 |
| р. Верхняя Ангара — с. Верхняя Заимка | 20600 | 45 | 272 | | 0,16 | | 1,9 |

Монгольская часть бассейна

Общая площадь Монгольской части бассейна озера Байкал равна 299 000 км². Вся эта территория относится к бассейну р. Селенги. Река Селенга на входе в Россию имеет площадь бассейна 282 000 км². Оставшиеся 17 тыс. км² относятся к бассейнам притоков р. Селенги: Чикоя, Желтуры (притока р. Джиды) и междуречья Селенги и Джиды. К бассейну р. Чикой относится чуть менее 12 тыс. км², к бассейну р. Желтура — около 5 тыс. км², а к Селенгинско-Джиджинскому междуречью около 500 км². Гидрологический пост Наушки находится на р. Селенге практически непосредственно ниже российско-монгольской границы, поэтому его данные позволяют учесть сток с 94% монгольской части бассейна озера Байкал. Гидрологический пост на р. Желтура учитывает сток, поступающий с территории примерно 1,7% монгольской части бассейна. Таким образом, данными гидрологических наблюдений освещено более 95% монгольской части бассейна озера Байкал (рисунок 1.8).

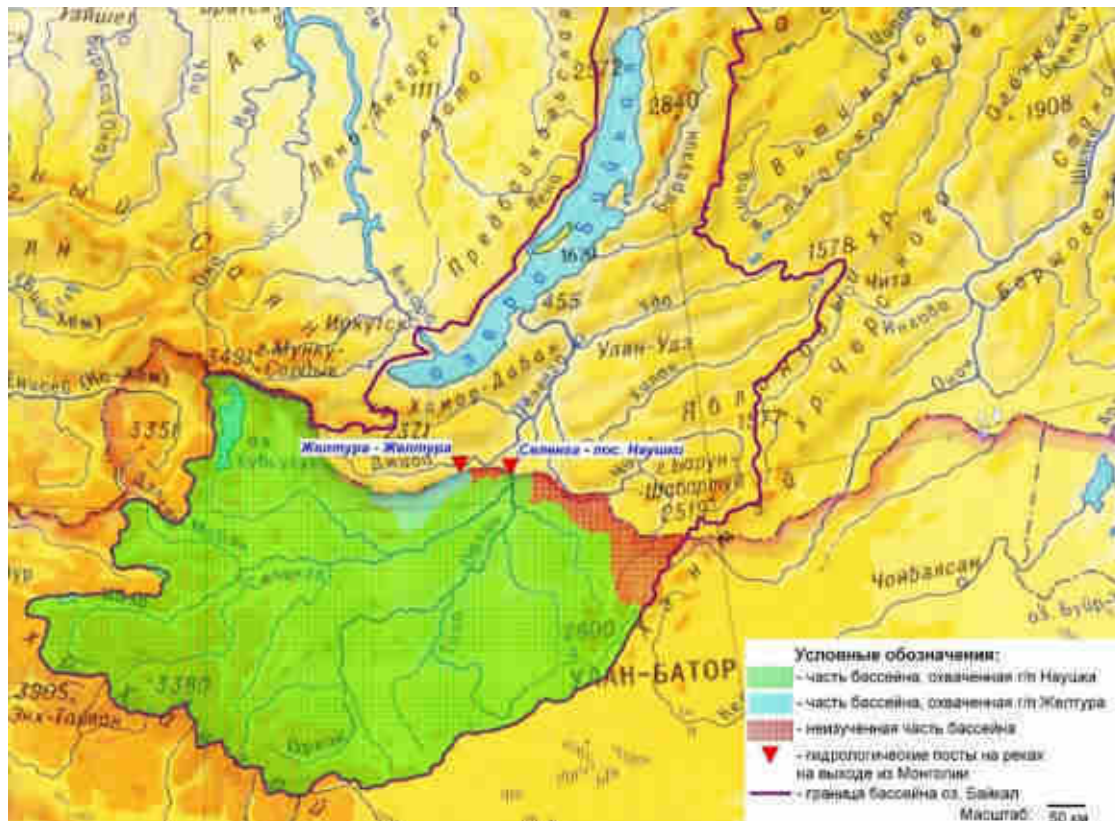


Рисунок 1.8. Освещенность данными наблюдений монгольской части бассейна озера Байкал

Анализ многолетних колебаний стока р. Селенги на г/п Наушки позволяет выявить резкое уменьшение его изменчивости, а также средних значений примерно с середины 1990-х гг. (рисунок 1.9–1.11).

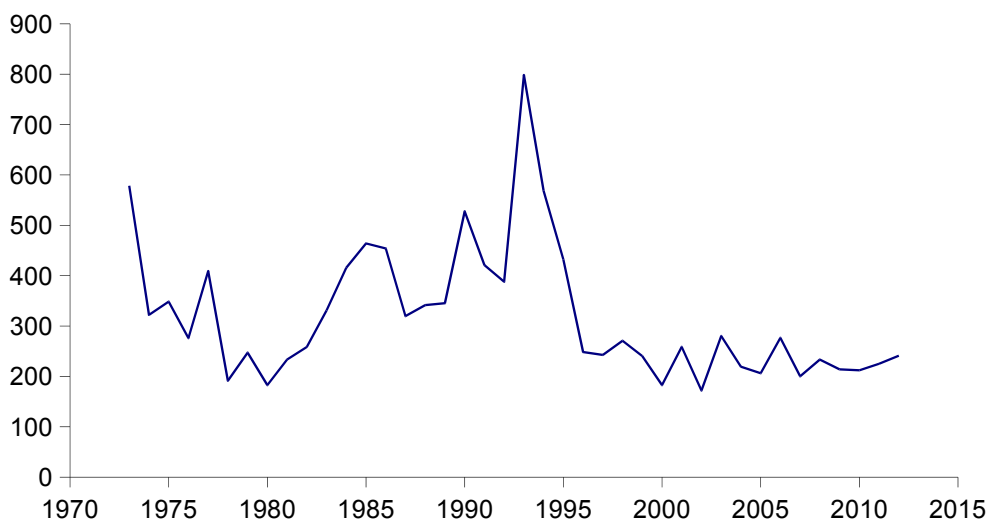


Рисунок 1.9. Многолетние колебания средних годовых расходов воды р. Селенги на г/п Наушки

Анализ многолетних изменений объема речного стока показывает наличие устойчивого периода понижения среднегодовой водности р. Селенга в нижнем течении (г/п Мостовой), который пришел на смену периоду роста водности (рисунок 1.10). При этом минимальный годовой сток до середины 1990-х годов имел выраженную тенденцию к росту, о чем свидетельствует ряд минимальных в году месячных расходов воды (рисунок 1.11). С начала 2000-х годов минимальные в году расходы воды также начали проявлять тенденцию к снижению, что свидетельствует об общем снижении водообеспеченности в бассейне.

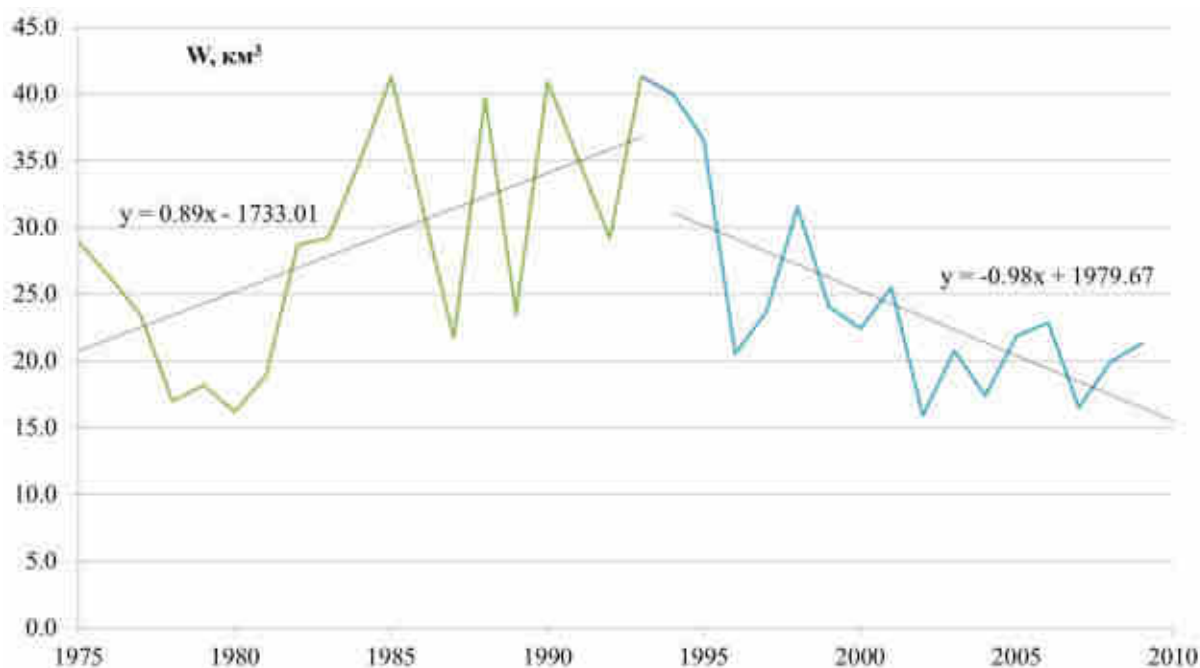


Рисунок 1.10. Изменения объема стока р. Селенги на г/п Мостовой за период с 1975 по 2010 гг. Линиями показаны направления трендов

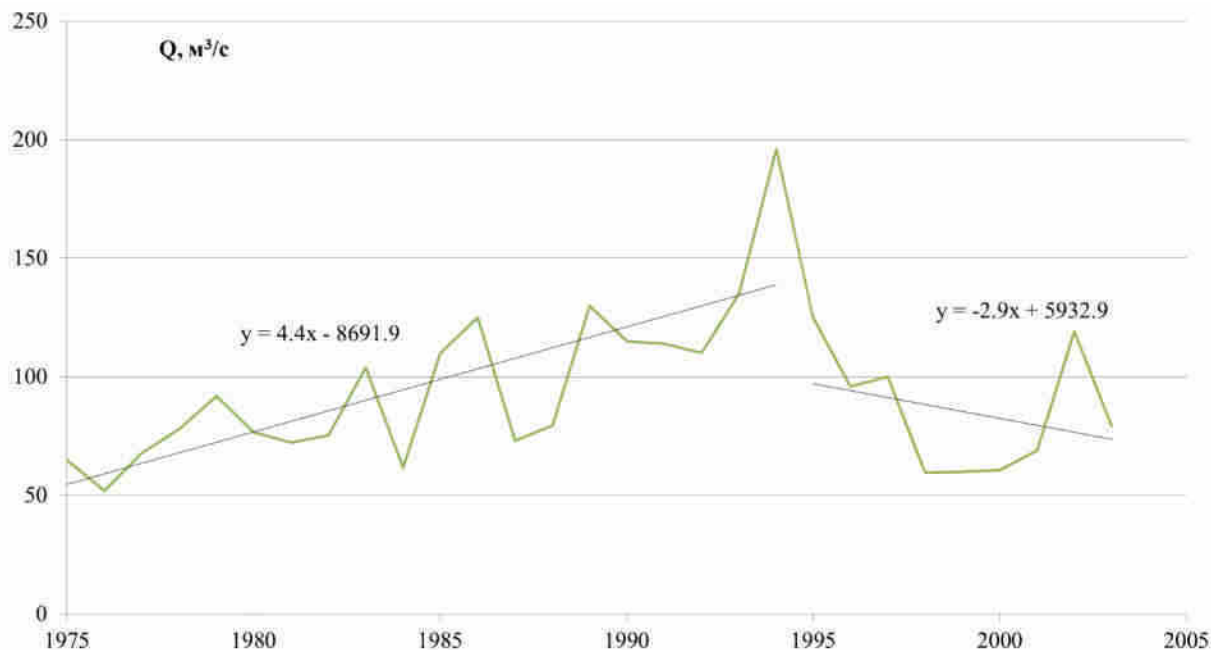


Рисунок 1.11. Минимальные в году расходы воды р. Селенги на г/п Мостовой

Значение среднего многолетнего расхода воды р. Селенги в пос. Наушки до 1995 г. составляло 386 м³/с. По данным наблюдений с 1996 по 2012 гг. оно сократилось в 1,7 раза и составило 231 м³/с. Коэффициент вариации годового стока до 1995 г. составлял 0,43, а после 1996 г. стал равен 0,1. Таким образом, изменчивость годового стока сократилась более чем в 4 раза. Для р. Желтура таких тенденций не прослеживается.

Для оценки стока с монгольской части бассейна озера Байкал, не охваченных наблюдений, использованы данные среднего многолетнего слоя стока, полученного по гидрологическому посту Наушки за период до 1995 г. Полученные результаты представлены в таблице 1.6.

Таблица 1.6. Приток воды с монгольской части бассейна озера Байкал

| Часть бассейна | Площадь, тыс. км ² | Слой стока, мм | | Объем притока, км ³ | |
|----------------------------|-------------------------------|----------------|---------------|--------------------------------|---------------|
| | | До 1995 г. | После 1996 г. | До 1995 г. | После 1996 г. |
| Селенга выше г/п Наушки | 282 | 43 | 26 | 12,2 | 7,3 |
| Желтура | 5 | 127 | | 0,6 | |
| Неучтенный приток | 12 | 43 | | 0,5 | |
| Всего по монгольской части | 299 | 45 | 28 | 13,3 | 8,4 |

Внутригодовое изменение притока воды с монгольской части бассейна характеризуют данные гидрологического поста Наушки (рисунок 1.12). На нем четко

видно, что изменение водности, произошедшее в середине 1990-х гг., коснулись многоводных сезонов. Расходы воды маловодных сезонов остались практически без изменения.

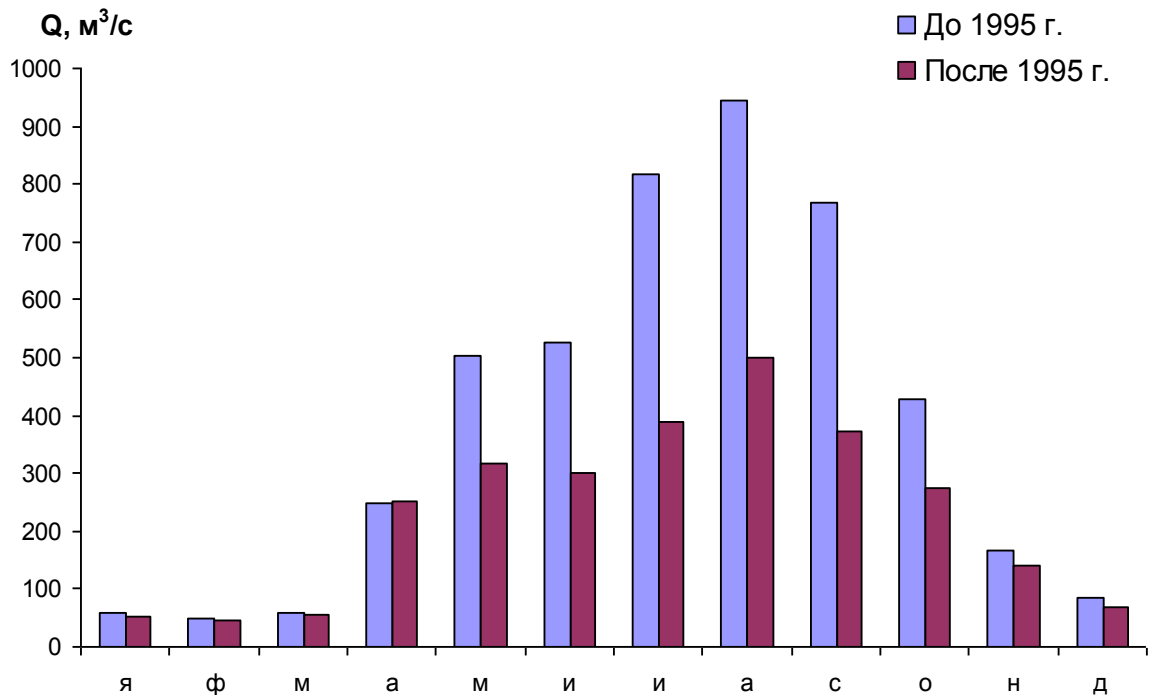


Рисунок 1.12. Внутригодовое распределение стока р. Селенги на г/п Наушки

Российская часть бассейна

Для рек, бассейны которых полностью расположены в пределах Российской Федерации, тенденций изменения среднего годового стока в середине 1990-х гг. не выявляется. Для р. Селенги эта тенденция прослеживается на всей длине, однако по мере приближения к устью ее эффект ослабевает (см. таблицу 1.5). Так для гидрологического поста в с. Кабанск средний многолетний расход воды до 1995 г. и после 1996 г. отличается в 1,4 раза (970 против 697 м³/с). Коэффициент вариации снижается примерно вдвое: с 0,31 до 0,15. Кроме того, его значение по данным наблюдений после 1996 г. возрастает по длине Селенги, что связано с поступлением воды с российской части бассейна. Правда, разница между средними многолетними значениями расходов воды, полученными по данным до 1995 г. и после 1996 г. возрастает по длине реки. Для гидрологического поста Наушки она составляет 155 м³/с, а для г/п Кабанск увеличивается до 273 м³/с. Следовательно, уменьшение стока с середины 1990-х гг. произошло и в российской части

бассейна р. Селенги, хотя выражено оно меньше по сравнению с монгольской частью. В наилучшей степени это иллюстрирует график продольного изменения водоносности р. Селенги в пределах российского участка (рисунок 1.13)

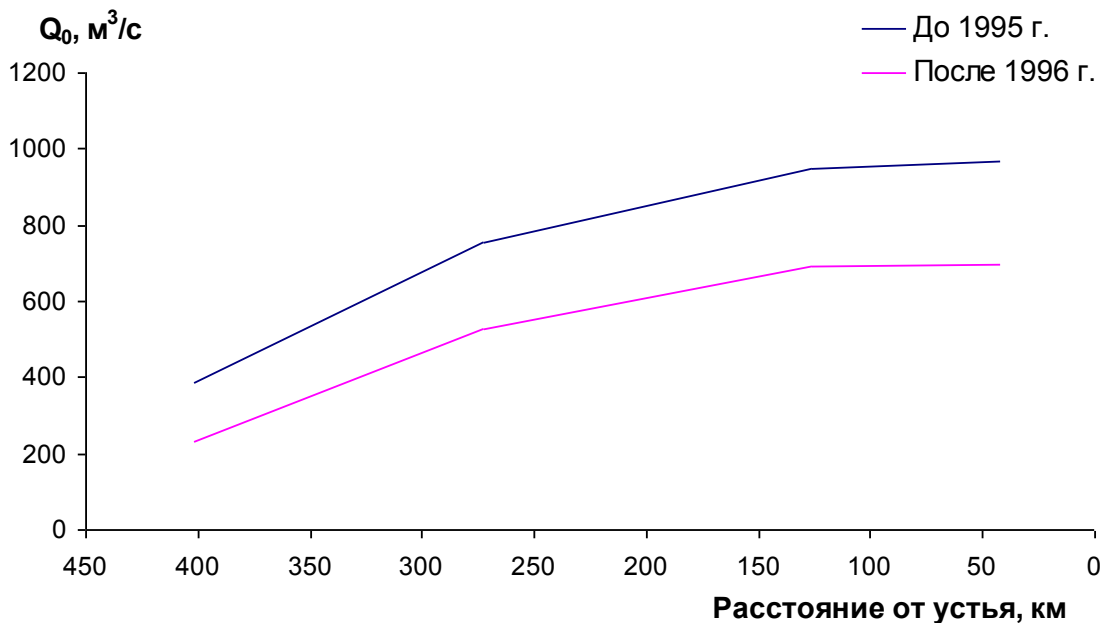


Рисунок 1.13. Продольное изменение водоносности р. Селенги в пределах российского участка до 1995 г. и после 1996 г.

Значительная часть площади водосбора Байкала охвачена данными гидрометрических наблюдений (рисунок 1.14). Общая площадь российской части бассейна озера Байкал равна 246 тыс. км². Сумма площадей водосборов рек, впадающих в Байкал, в замыкающих створах гидрологических постов составляет более 198 тыс. км² или 80,6% от площади российской части бассейна. Не охваченная гидрологическими наблюдениями часть бассейна озера Байкал равна 47 800 км² или 19,4% от площади российской части бассейна. Что касается общей площади бассейна Байкала, включающей российскую и монгольскую части, то изученная в гидрологическом отношении территория составляет 91,2%, а неизученная — 8,8%.

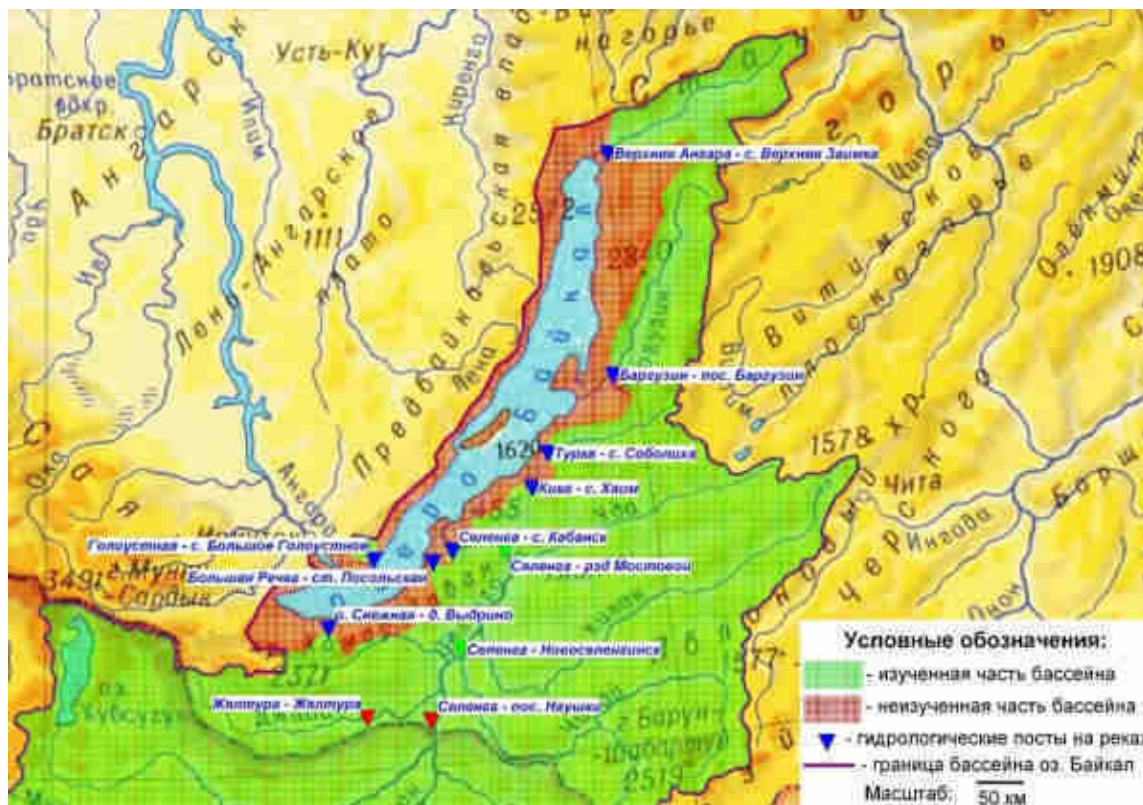


Рисунок 1.14. Водосборы гидрологических постов замыкающих створов рек, впадающих в озеро Байкал

Несколько другой расклад получается при рассмотрении объема притока к отдельным котловинам озера (рисунок 1.15). Площадь бассейна Северной котловины составляет около 43 тыс. км³. Из них изученная часть составляет 48%. Из изученных рек в Северную котловину впадает только р. Верхняя Ангара. Наиболее изученной является Средняя котловина, в которую впадает р. Селенга и еще несколько изученных рек: Баргузин, Турка и Кика. Площадь водосбора Средней котловины составляет около 485 тыс. км², из которых 97% относится к изученной части. Неучтенным в Средней котловине остается приток с северо-западного берега Байкала, однако в этой части водораздельная линия расположена максимально близко к озеру, поэтому доля этого притока невелика. Наименее изучен приток, поступающий в южную котловину озера Байкал. При площади водосбора около 17 тыс. км² изученными являются только 29%. Это реки Голоустная, Большая Речка и Снежная. Все они имеют площади водосбора менее 5 тыс. км². Однако, в отличие от других котловин, здесь гидрологические посты расположены на реках, впадающих с разных берегов озера Байкал.

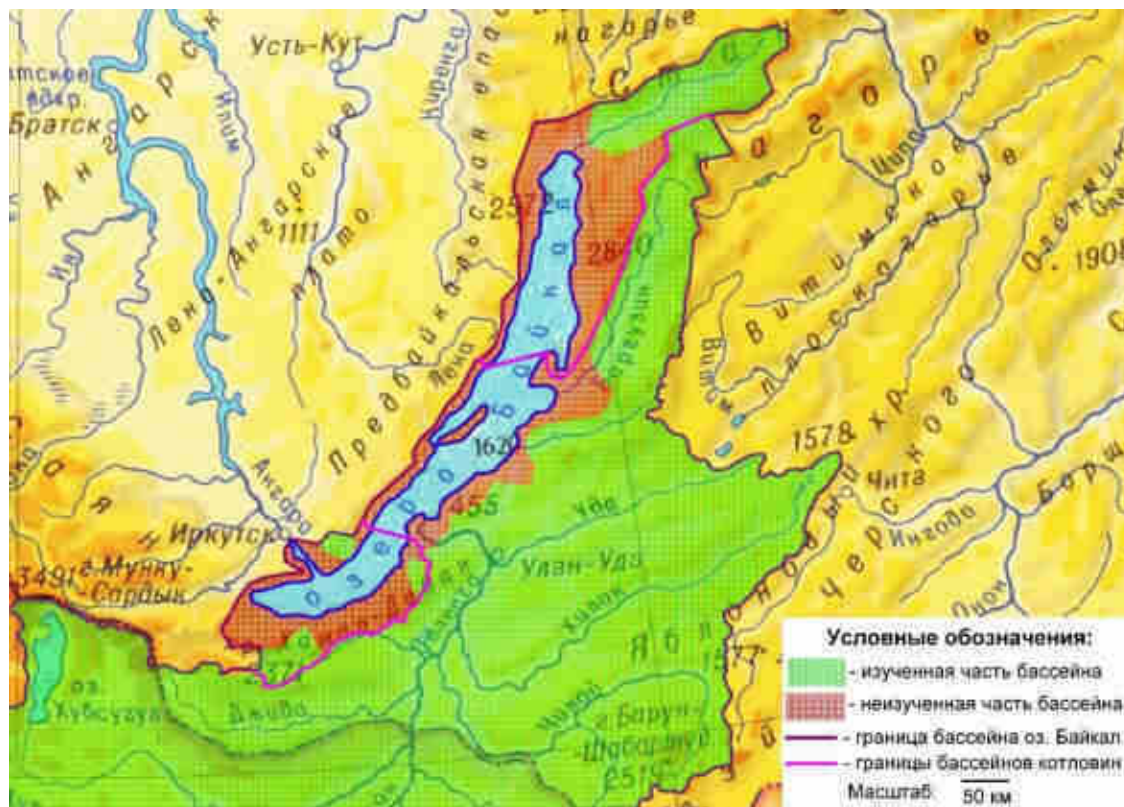


Рисунок 1.15. Соотношение гидрологически изученных и неизученных частей бассейнов основных котловин озера Байкал

Расчет объема притока воды с неизученных территорий проводился отдельно для каждой котловины с использованием данных о площадях их бассейнов и среднего многолетнего слоя стока. Средний многолетний слой стока определялся по данным ближайших гидрологических постов. Для бассейна Северной котловины использовалось средневзвешенное значение, полученное по рекам Верхняя Ангара и Баргузин. Для Средней котловины бралось средневзвешенное значение, полученное по рекам, впадающим в нее, исключая бассейн р. Селенги, поскольку последний расположен значительно южнее, чем неизученная территория бассейна озера Байкал. Для южной котловины бралось средневзвешенное значение слоя стока, полученное по рекам, в нее впадающим. Результаты расчета поверхностного притока воды к озеру Байкал представлены в таблице 1.7. Полученное значение объема общего годового поверхностного притока к озеру Байкал по данным до 1995 г. получилось очень близко к ранее полученным оценкам. Однако, после 1996 г. объем годового притока сократился примерно на 14%. При этом, в российской части бассейна сокращение составило около 7%, а в монгольской части — 38%.

Таблица 1.7. Расчет поверхностного притока воды к озеру Байкал

| Часть бассейна | Площадь бассейна, км ² | Слой стока, мм | | Объем притока, км ³ | |
|---|-----------------------------------|----------------|---------------|--------------------------------|---------------|
| | | До 1995 г. | После 1996 г. | До 1995 г. | После 1996 г. |
| Северная котловина | | | | | |
| р. Верхняя Ангара — с. Верхняя Заимка | 20600 | 416 | | 8,58 | |
| Неизученная часть бассейна котловины | 22000 | 311 | | 6,85 | |
| Всего по котловине | 42600 | 362 | | 15,4 | |
| Средняя котловина | | | | | |
| р. Баргузин — пос. Баргузин | 19800 | 201 | | 3,99 | |
| р. Турка — с. Соболиха | 5050 | 336 | | 1,70 | |
| р. Кика — с. Хаим | 1740 | 443 | | 0,77 | |
| Неизученная часть бассейна котловины | 13000 | 243 | | 3,23 | |
| р. Селенга — с. Кабанск (весь бассейн) | 445000 | 69 | 49 | 30,6 | 22,0 |
| р. Селенга — с. Кабанск (российская часть бассейна) | 146000 | 118 | 93 | 17,3 | 13,5 |
| Всего по российской части бассейна котловины | 186000 | 145 | 126 | 27,0 | 23,4 |
| Всего по котловине | 485000 | 83 | 65 | 40,3 | 31,7 |
| Южная котловина | | | | | |
| р. Голоустная — с. Большое Голоустное | 1480 | 168 | | 0,25 | |
| р. Большая Речка — ст. Посольская | 565 | 677 | | 0,38 | |
| р. Снежная — д. Выдрино | 3000 | 484 | | 1,45 | |
| Неизученная часть бассейна котловины | 12400 | 413 | | 5,12 | |
| Всего по котловине | 17500 | 413 | | 7,2 | |
| Байкал в целом | | | | | |
| Российская часть бассейна | 246000 | 202 | 187 | 49,6 | 46,1 |
| Весь бассейн | 545000 | 115 | 100 | 62,9 | 54,3 |

В течение года приток воды распределен неравномерно. Большая часть воды поступает в летние месяцы. По данным (Гармаев, Христофоров, 2010) характер внутригодового стока несколько отличается в северной (бассейн р. Кика и севернее) и южной части бассейна. В южной части бассейна основным источником питания рек являются дождевые, а в северной части бассейна весомую часть могут играть талые воды. Внутригодовое распределение стока основных рек, впадающих в Байкал, иллюстрируют рисунки 1.16–1.18.

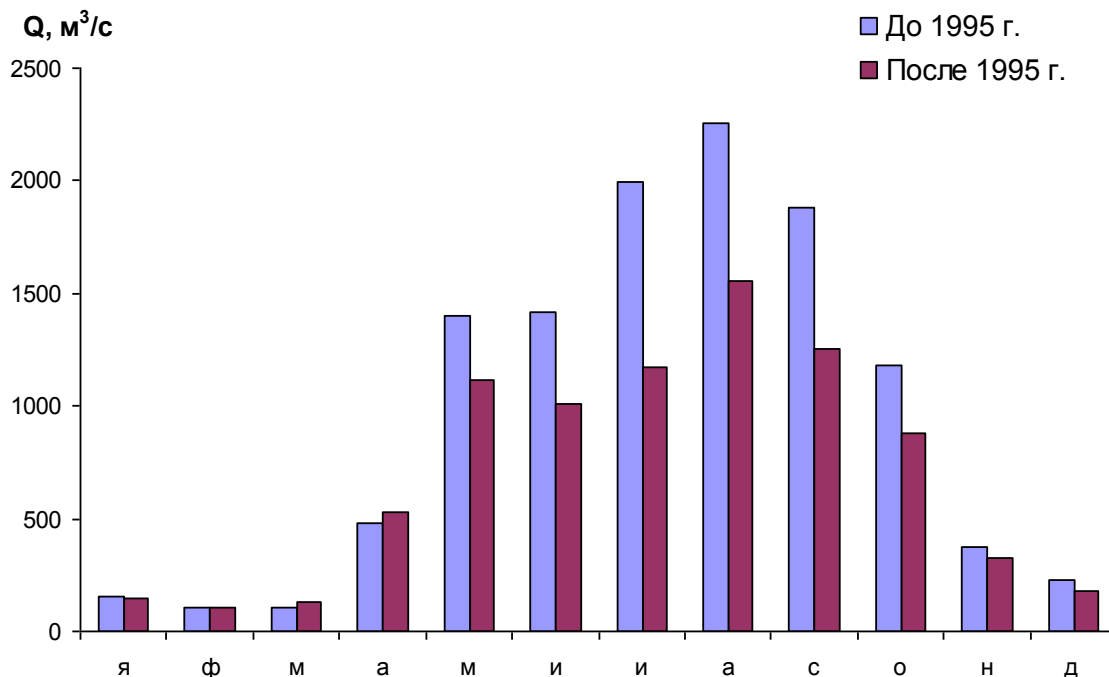


Рисунок 1.16. Внутригодовое распределение стока р. Селенги на г/п Кабанск

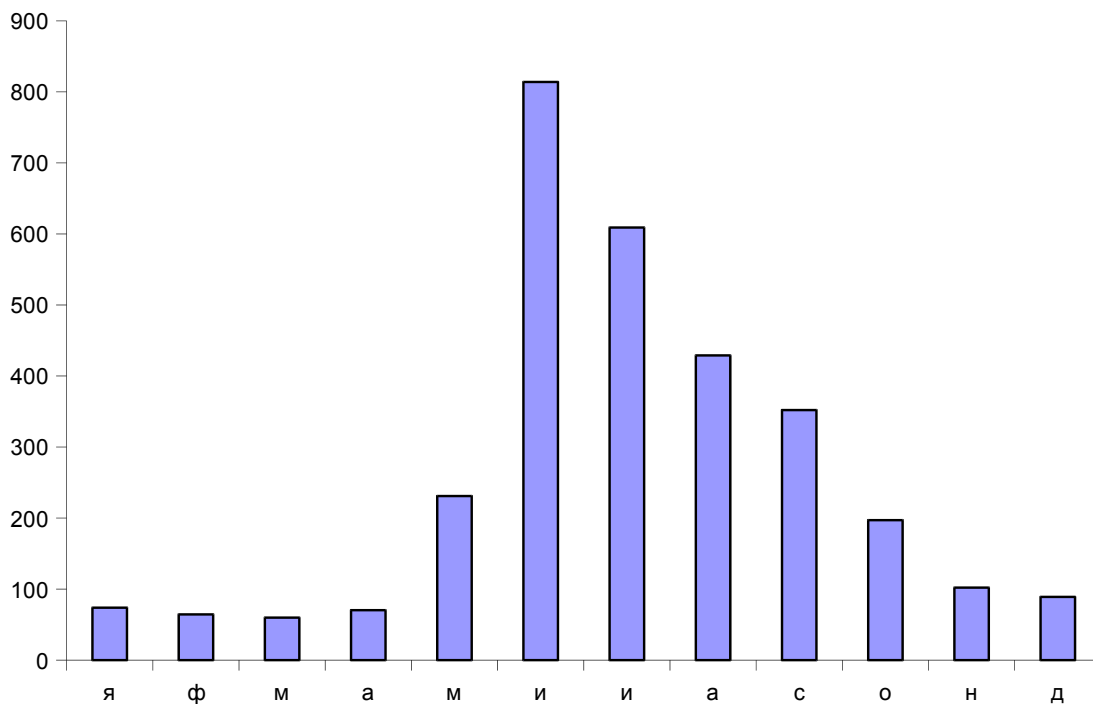


Рисунок 1.17. Внутригодовое распределение стока р. Верхняя Ангара

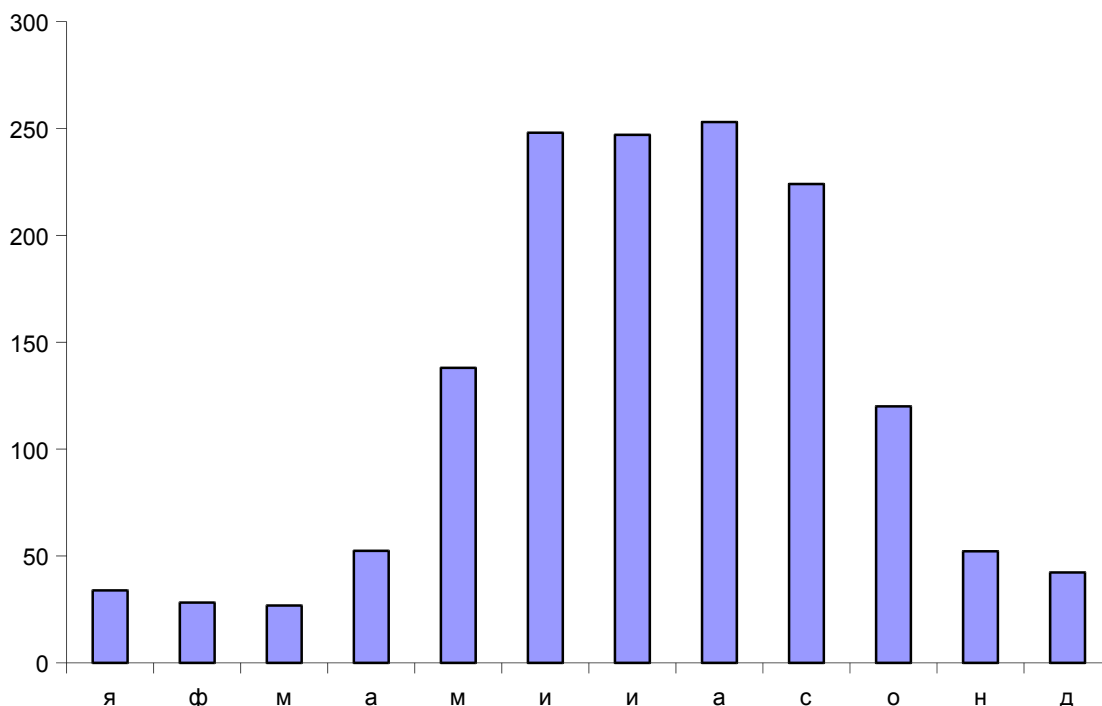


Рисунок 1.18. Внутригодовое распределение стока р. Баргузин

1.4. Подземный приток

По данным В.Н. Синюковича разгрузка подземных вод в озере Байкал составляет 1,64 км³/год. Эта величина очень незначительна по сравнению с притоком поверхностных вод и даже с осадками. Для оценки подземного притока воды к основным котловинам озера Байкал значение общего подземного притока распределено между ними пропорционально их площадям (таблица 1.8)

Таблица 1.8. Приток подземных вод к озеру Байкал

| Название котловины | Площадь поверхности, км ² | Объем подземного притока, км ³ |
|--------------------|--------------------------------------|---|
| Северная | 11340 | 0,59 |
| Средняя | 13045 | 0,68 |
| Южная | 7115 | 0,37 |
| Байкал весь | 31500 | 1,64 |

Таким образом, сумма приходных составляющих водного баланса озера Байкал по данным до 1995 г. составляет 75 км³. По данным после 1996 г. она сократилась до 66 км³ за счет сокращения притока преимущественно с монгольской части бассейна. Основную долю в приходной части водного баланса составляет поверхностный приток воды (82–

84%). На втором месте идут атмосферные осадки (14–16%). Третье место занимает разгрузка подземных вод (около 2%).

Сток воды из озера

Главной расходной составляющей водного баланса является сброс воды через Иркутскую плотину в р. Ангару. Данные о сбросе воды представлены в таблице 1.9.

Таблица 1.9. Сброс воды через Иркутскую ГЭС

| Период | Средний многолетний расход воды | Cv | Ошибка среднего расхода воды, % | Объем стока, км ³ |
|------------------|---------------------------------|------|---------------------------------|------------------------------|
| До 1990-х гг. | 1880 | 0,14 | 3,2 | 59,2 |
| После 1990-х гг. | 1700 | 0,05 | 2,4 | 53,5 |

В последние годы сбросы воды через Иркутскую ГЭС сократились почти на 6 км³/год. Это связано с уменьшением притока воды к озеру Байкал. Что касается внутригодового распределения стока, то оно достаточно равномерное и не претерпело существенных изменений в последние годы (рисунок 1.19).

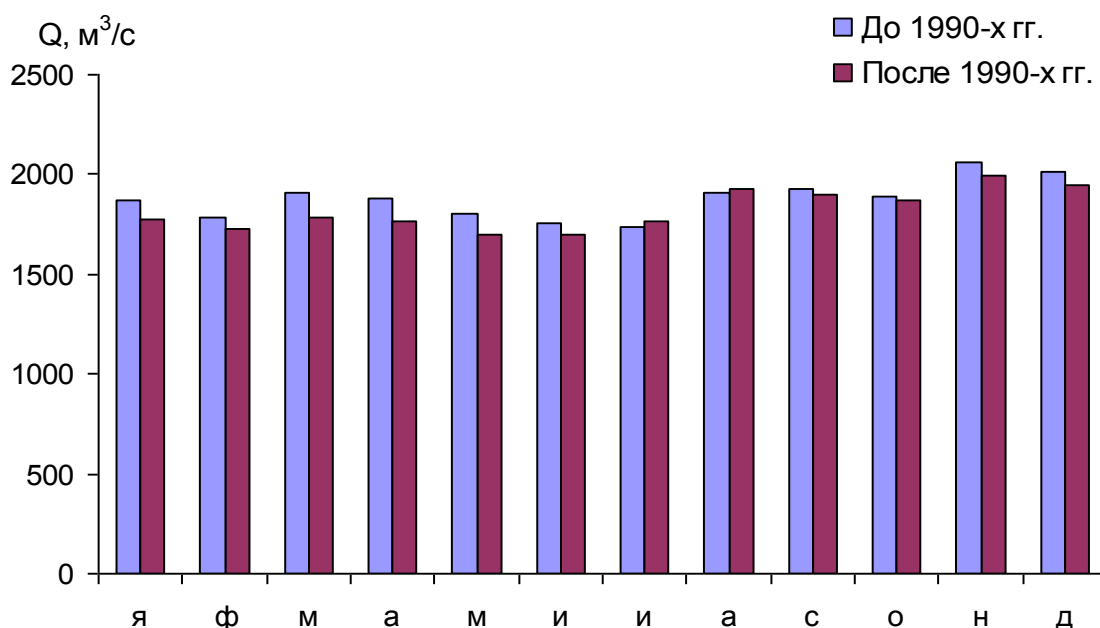


Рисунок 1.19. Внутригодовое распределение стока р. Ангары в створе Иркутской ГЭС

1.5. Испарение

Испарение определено по разнице между суммой расходных составляющих водного баланса и стока воды из озера. За репрезентативный период, длившийся с 1962 г. после начала нормальной эксплуатации Иркутской ГЭС и до середины 1990-х гг., когда произошло сокращение притока воды, объем воды в озере Байкал оставался относительно постоянным. Исходя из этого, можно считать, что сумма расходных составляющих водного баланса за этот период была равна сумме приходных. Таким образом, годовой объем испарения должен был составлять $15,7 \text{ км}^3$, что соответствует среднему слою испарения, равному 500 мм. Это согласуется с опубликованными данными (Мировой..., 1974).

Изменения дефицита влажности воздуха, характеризующего испарение с поверхности бассейна, за период с 1995 по 2013 годы, показывают незначительное и статистически незначимое увеличение (рисунок 1.20).

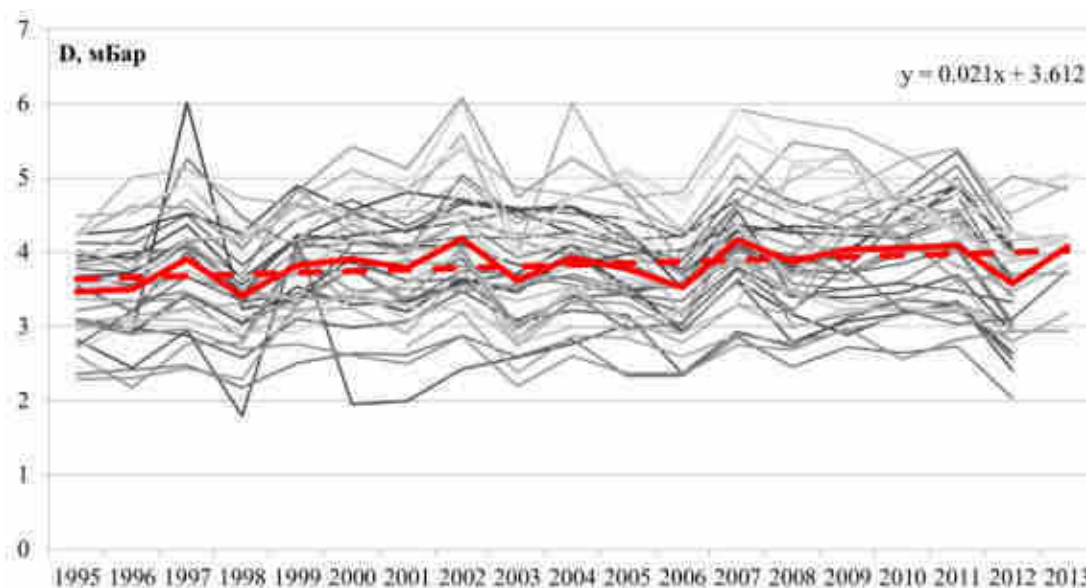


Рисунок 1.20. Среднегодовое значение дефицита влажности воздуха на 41 станции в бассейне Селенги (российская и монгольская части). Красная сплошная линия — среднее по всем станциям, пунктирная — линейный тренд

1.6. Интегральная оценка водного баланса озера Байкал

Общая картина составляющих водного баланса представлена в таблице 1.10.–1.11

Таблица 1.10. Водный баланс озера Байкал за период с 1962 по 1995 гг.

| Составляющие водного баланса | | Значение, км ³ | Доля от прихода (расхода) |
|------------------------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Приходные | Осадки | 10,4 | 14 |
| | Поверхностный приток | 62,9 | 84 |
| | Подземный приток | 1,64 | 2 |
| | Сумма прихода | 74,9 | 100 |
| Расходные | Сток через Иркутскую ГЭС | 59,2 | 79 |
| | Испарение | 15,7 | 21 |
| | Сумма расхода | 74,9 | 100 |

В середине 1990-х гг. произошло сокращение поверхностного притока воды к озеру Байкал примерно на 9 км³/год. Количество осадков осталось без изменения. Сток воды из озера также сократился, однако это сокращение составило всего 6 км³/год. При условии постоянства слоя испарения объем озера Байкал ежегодно будет уменьшаться на 3 км³. При современной площади озера, равной 31 500 км², это соответствует ежегодному понижению среднего уровня воды примерно на 9 см. Понижение уровня будет проходить до тех пор, пока площадь акватории Байкала не сократится до 25 500 км². В этом случае произойдет уменьшение ежегодного объема испарения на 3 км³ за счет сокращения площади водной поверхности. Чтобы этого не произошло, необходимо сократить сбросы воды в р. Ангару через Иркутскую плотину до 50,2 км³/год. Это будет соответствовать среднему расходу воды, равному 1600 м³/с.

Таблица 1.11. Современный Водный баланс озера Байкал (после 1995 гг.)

| Составляющие водного баланса | | Значение, км ³ | Доля от прихода (расхода) |
|------------------------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Приходные | Осадки | 10,4 | 15,7 |
| | Поверхностный приток | 54,3 | 81,9 |
| | Подземный приток | 1,64 | 2,5 |
| | Сумма прихода | 66,34 | 100 |
| Расходные | Сток через Иркутскую ГЭС | 53,2 | 77,2 |
| | Испарение | 15,7 | 22,8 |
| | Сумма расхода | 68,9 | 100 |

Глава 2. Оценка трендов в многолетнем цикле водного баланса бассейна реки Селенга

В условиях засушливого климата, которым характеризуется бассейн р. Селенга, основным фактором изменений компонентов водного баланса является повышение среднегодовой температуры воздуха. За последние 60 лет среднегодовая температура воздуха на территории Монголии увеличилась на 1,66 °С, причем наиболее интенсивный рост температуры был отмечен в 1970-х — 1980-х годах (Batimaetal., 2005). Анализ дат образования и схода снежного покрова — характерного гидроклиматического показателя, реагирующего на изменения, — подтверждает общую тенденцию к увеличению зимних температур. В среднем, сход снежного покрова в последние 30 лет наблюдается на 10 дней ранее (Batimaetal., 2005).

На фоне изменения среднегодовых и сезонных температур, в центральной части Монголии, к которой относится и бассейн р. Селенга, отмечается и тренд к снижению количества атмосферных осадков. Масштаб уменьшения среднегодового количества осадков достигает 50–80 мм за период с 1970 по 2001 годы (Batima, etal., 2005).

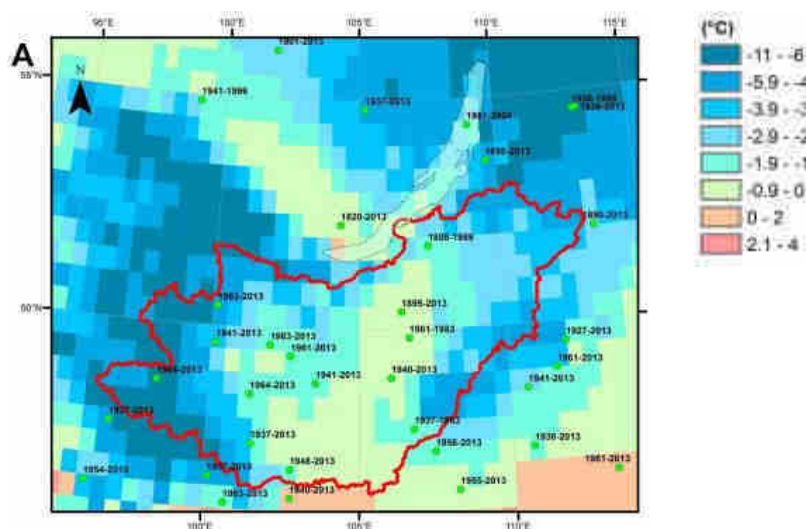
Для оценки многолетних изменений компонентов водного баланса бассейна Селенги были использованы два подхода:

1. оценка изменений температуры, осадков и испаряемости в бассейне р. Селенга на основе данных эксперимента CMIP5 (Climate Models Intercomparison Project 5 (Tayloreetal., 2012; Törnqvistetal., 2014) по ансамблю моделей общей циркуляции атмосферы (МОЦА);
2. оценка изменений водообеспеченности территории бассейна р. Селенга глобальной гидрологической модели WaterGAP3 (Verzano. 2009; Kartheetal., 2013) в рамках проекта WATCH (Weedon, 2013).

Результаты оценок по этим экспериментам приведены в настоящем разделе. Дается детальное описание проведенных экспериментов и полученные результаты. Были составлены оценки изменения таких компонентов водного баланса, как годовая сумма осадков, средняя годовая и сезонная температуры и испаряемость на краткосрочную (до 2039 г.) и более долгосрочную перспективу (до 2099 г.) в зависимости от различных сценариев эмиссии парниковых газов в атмосферу, разработанных IPCC (Intergovernmental

Panel on Climate Change (IPCC), 2013. In: Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, Y., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley, P.M. (Eds.), Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.).

Сначала по историческим данным наблюдений была проверена адекватность воспроизведения климатическими моделями рядов метеовеличин (средних месячных и годовых температур и сумм осадков) на историческом материале натуральных наблюдений за период с 1938 по 2009 годы. Для оценки исторических изменений метеоэлементов в бассейне р. Селенга были использованы материалы проекта CRU TS3.10/CRU TS3.10.01 (Harris, I., Jones, P.D., Osborn, T.J., Lister, D.H., 2014. Updated high-resolution grids of monthly climatic observations — the CRU TS3.10 Dataset. *Int. J. Clim.* 34, 623–642. <http://dx.doi.org/10.1002/joc.3711>), предоставляемые в виде интерполированных на расчетную сетку 0,5°x 0,5° данных регулярных наблюдений на более чем 40 станциях внутри и вокруг границ бассейна р. Селенга (рисунок 2.1).



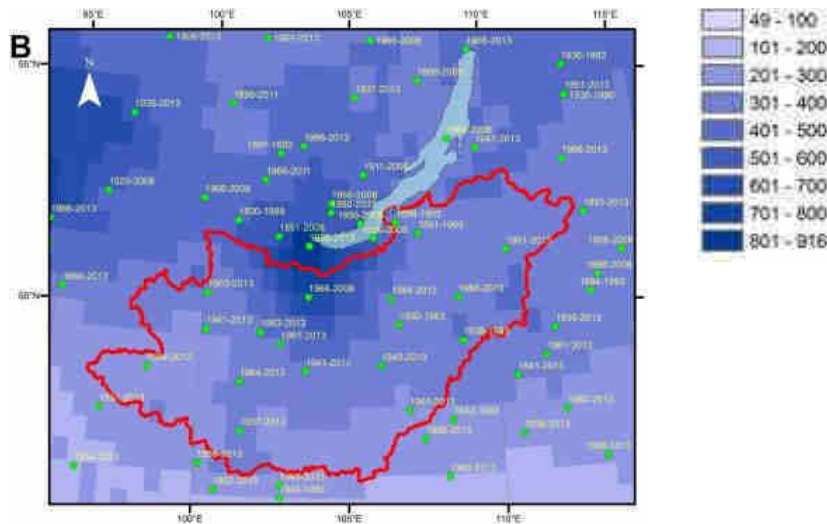


Рисунок 2.1. Расположение станций CRU TS3.10/CRU TS3.10.01 в районе исследований и среднеголетние значения среднегодовых температур воздуха (А, °С) и суммы осадков (В, мм), интерполированные на расчетную сетку

Использованные в расчетах станции достаточно равномерно расположены внутри бассейна Селенги на высотах от 400 до 2200 м, что позволяет расценивать их данные как репрезентативные для почти всех природных зон, встречающихся в бассейне.

Данные CRU TS3.10/CRU TS3.10.01 были дополнительно оценены на предмет наличия ошибок, связанных с недоучетом твердых осадков и орографии и были введены соответствующие поправки (Adam, J.C., Lettenmaier, D.P., 2003. Adjustment of global gridded precipitation for systematic bias. *J. Geophys. Res.* 108, 1–14.; Adam, J.C., Clark, E.A., Lettenmaier, D.P., Wood, E.F., 2006. Correction of global precipitation products for orographic effects. *J. Clim.* 19, 15–38.).

Речной сток оценивался по суточным данным на г/п р. Селенга — п. Мостовой за период с 1938 по 2009 год.

Испарение с поверхности бассейна оценивалось по балансовому методу как

$$ET = P - R - \Delta S, (0.)$$

где ET — среднеголетнее значение испарения с поверхности бассейна, мм; P — атмосферные осадки, мм; R — среднеголетний сток Селенги, мм; ΔS — изменение влагозапасов в бассейне, мм. Было принято допущение, что среднеголетние изменения влагозапасов в бассейне стремятся к 0 и испарение может быть оценено по разности приходных и расходных компонентов.

В таблице 2.1 приводится список моделей, расчеты по которым были использованы для оценок. Всего было использованы расчеты по 22 моделям общей циркуляции. Для оценки модельных расчетов за исторический период были выделены следующие расчетные периоды: 1961–1990, 1961–1980 и 1986–2005. Для прогнозных оценок были использованы расчеты за период с 2010 по 2039 гг. (краткосрочная перспектива) и за период с 2070 по 2099 гг. (долгосрочная перспектива).

Таблица 2.1. Список моделей CMIP5, использованных в расчетах

| № | Название модели | Разработчик |
|----|-----------------|---|
| 1 | BNU-ESM | College of Global Change and Earth System Science, Beijing Normal University |
| 2 | CCSM4 | National Center for Atmospheric Research |
| 3 | CNRM-CM5 | Centre National de Recherches Météorologiques/Centre Européen de Recherche et Formation Avancée en Calcul Scientifique |
| 4 | CSIRO-Mk3-6-0 | Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization in collaboration with Queensland Climate Change Centre of Excellence |
| 5 | CanESM2 | Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis |
| 6 | FGOALS-g2 | LASG, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences and CESS, Tsinghua University |
| 7 | FIO-ESM | The First Institute of Oceanography, SOA, China |
| 8 | GFDL-CM3 | NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory |
| 9 | GFDL-ESM2G | NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory |
| 10 | GISS-E2-H | NASA Goddard Institute for Space Studies |
| 11 | GISS-E2-R | NASA Goddard Institute for Space Studies |
| 12 | IPSL-CM5A-LR | Institut Pierre-Simon Laplace |
| 13 | IPSL-CM5A-MR | Institut Pierre-Simon Laplace |
| 14 | MIROC-ESM | Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), and National Institute for Environmental Studies Institute for Environmental Studies |
| 15 | MIROC-ESM-CHEM | Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), and National Institute for Environmental Studies |
| 16 | MIROC5 | Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology |
| 17 | MPI-ESM-LR | Max-Planck-Institut für Meteorologie (Max Planck Institute for Meteorology) |
| 18 | MPI-ESM-MR | Max-Planck-Institut für Meteorologie (Max Planck Institute for Meteorology) |
| 19 | MRI-CGCM3 | Meteorological Research Institute |
| 20 | NorESM1-ME | Norwegian Climate Centre |
| 21 | Bcc-csm1-1 | Beijing Climate Center, China Meteorological Administration |
| 22 | Bcc-csm1-1-m | Beijing Climate Center, China Meteorological Administration |

Расчеты по моделям производились для двух сценариев эмиссии парниковых газов, предложенных IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2013. In: Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, Y, Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley, P.M. (Eds.), Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535pp.): сценария RCP2.6, по которому предполагается невысокий рост концентрации CO₂ и сценария RCP8.5, предполагающего существенно больший рост.

Сравнение среднемноголетних сумм осадков по данным наблюдений и осредненных для ансамбля моделей CMIP5 показало, что среднее по ансамблю значение за 1961–1990 годы на 15% превосходит данные наблюдений, даже при наличии поправки в данных наблюдений на недоучет твердых осадков. Введение поправки на орографию привело к увеличению среднего многолетнего количества осадков на 18% относительно среднеансамблевого значения. В связи с этим дальнейшие оценки приводятся только относительно наблюдаемых значений суммы осадков, которым применена поправка на недоучет твердых осадков.

Также были сопоставлены значения средних многолетних среднегодовых величин испаряемости ET, температуры T и слоя стока R (рисунок 2.2). По расчетам для сценария RCP8.5, по которому предполагается высокая концентрация парниковых газов, за период с 1961 по 1990 годы среднее по ансамблю CMIP5 превышает фактические значения среднегодовой температуры на 0,3°C, осадков на 15%, испаряемости на 6% и слоя стока на 24%. Как в среднем по ансамблю, так и при анализе расчетов по отдельным моделям, не было обнаружено достаточно адекватного воспроизведения рассматриваемых характеристик за используемый период.

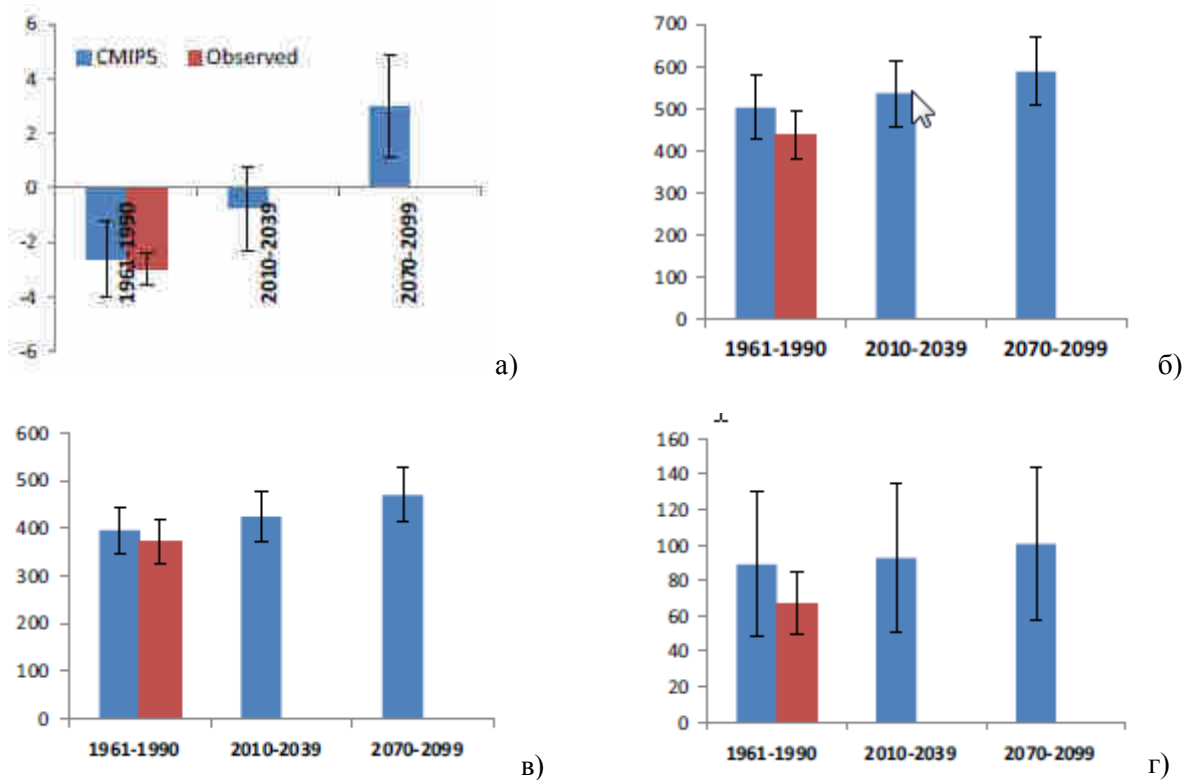


Рисунок 2.2. Среднегодовые средние по ансамблю моделей CMIP5 значения температуры (а), суммы осадков (б), испаряемости (в) и слоя стока (г) для бассейна Селенги за периоды с наличием наблюдений и на краткосрочную и долгосрочную перспективу. Синие столбики — данные расчетов по сценарию RCP8.5, красные — наблюдений. Выносками показан разброс значений по ансамблю (R. Törnqvist, J. Jarsjö, J. Pietroni, A. Bring, P. Rogberg, S. M. Asokan, G. Destouni. Evolution of the hydro-climate system in the Lake Baikal basin. Journal of Hydrology, Volume 519, Part B, 27 November 2014, Pages 1953–1962)

Расчеты по сценарию RCP8.5, предполагающему повышенную эмиссию парниковых газов на будущий период, показали увеличение температуры воздуха до 3°C в период с 2070 по 2099 годы. Такое увеличение среднегодовой температуры должно привести к деградации островной многолетней мерзлоты в пределах бассейна Селенги (рисунок 2.2). Изменению в количестве осадков до 550 мм сопутствует рост испаряемости. Тем не менее, увеличение речного стока, которое также предсказывается в среднем по ансамблю, не может считаться устойчивой оценкой ввиду большого разброса значений по отдельным моделям внутри ансамбля.

По сценарию RCP2.6 тенденции роста в целом соответствуют таковым, оцененным по сценарию RCP8.5, но масштаб этих изменений различается (рисунок 2.3). Так, если предсказываемый масштаб изменений на краткосрочную перспективу для двух сценариев сопоставим по значениям (по более интенсивному сценарию эмиссии масштаб изменений

стока даже несколько меньше, чем по менее интенсивному), то на долгосрочную перспективу изменения по сценарию RCP8.5 более чем в два раза превосходят таковые, предсказываемые по сценарию RCP2.6.

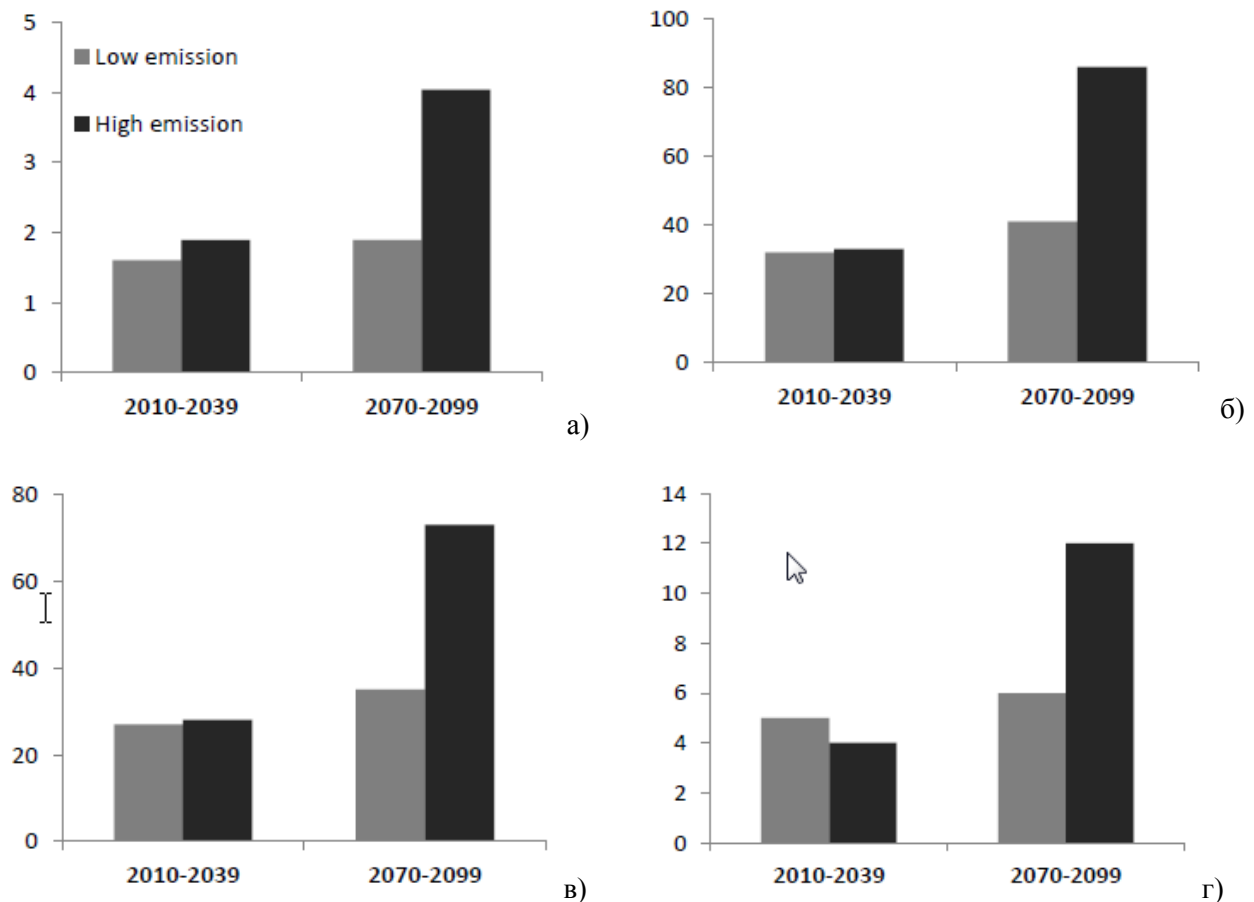


Рисунок 2.3. Сопоставление изменений в среднегодовых значениях температуры (а), суммы осадков (б), испаряемости (в) и слоя стока (г) бассейна Селенги, оцененных по сценариям RCP2.6 (серые столбики) и RCP8.5 (черные столбики) на будущие периоды (по сравнению с базовым периодом 1961 — 1990 годов)(R. Törnqvist, J. Jarsjö, J. Pietroni, A. Bring, P. Rogberg, S. M. Asokan, G. Destouni. Evolution of the hydro-climate system in the Lake Baikal basin. Journal of Hydrology, Volume 519, Part B, 27 November 2014, Pages 1953–1962)

2.1. Оценка изменений водообеспеченности территории бассейна р. Селенга глобальной гидрологической модели WaterGAP3

Для оценки водообеспеченности бассейна Селенги на долгосрочную перспективу была использована модель WaterGAP3 (Verzano, K. 2009: Climate change impacts on flood related hydrological processes: Further development and application of a global scale hydrological model. Reports on Earth System Science 71-2009. Hamburg: Max Planck Institute

for Meteorology; D. Karthe, M. Malsy, B. J. Kopp, S. Minderlein & L. Hülsmann. Assessing water availability and its drivers in the context of an integrated water resources management (IWRM): a case study from the Kharaa river basin, Mongolia. *Geoöko* volume/band XXXIV, 05 — 26 Göttingen 2013.), на входе которой были заданы ряды расчетов метеорологических характеристик по трем моделям общей циркуляции атмосферы по двум сценариям эмиссии парниковых газов. Были использованы модели IPSL-CM4, ECHAM5, и CNRM-CM3, рассчитывавшие климатические изменения по сценариям A2 и B1. Сценарий A2 предполагает глобальный рост населения Земли и рост эмиссии парниковых газов до конца XXI века, а сценарий B2 — рост обоих параметров до 2050 года с последующим их снижением до 2100 года.

Адаптация модели Water GAP3 была произведена для всей территории Монголии на основании интерполированных на глобальную расчетную сетку данных наблюдений на метеорологических станциях из проекта WATCH (Weedon, G. P.; Gomes, S.; Viterbo, P. et al. 2011: Creation of the WATCH Forcing Data and Its Use to Assess Global and Regional Reference Crop Evaporation over Land during the Twentieth Century. *Journal of Hydrometeorology* 12(5):823–848.), за период с 1971 по 2000 годы. Моделирование позволило выделить районы в бассейне Селенги и ее притоков, в которых годовая водообеспеченность снижается до 10 мм.

Расчеты по моделям общей циркуляции показали рост температуры воздуха в размере от 2,6 °C до 5,1 °C и осадков в пределах 20–86 мм по сравнению с текущим состоянием (рисунок 2.4). Эти оценки могут неадекватно отражать тенденцию к росту осадков, так как за период 1971–2000 годов расчеты по ним показали существенно более высокую водообеспеченность, чем оценивается по данным проекта WATCH.

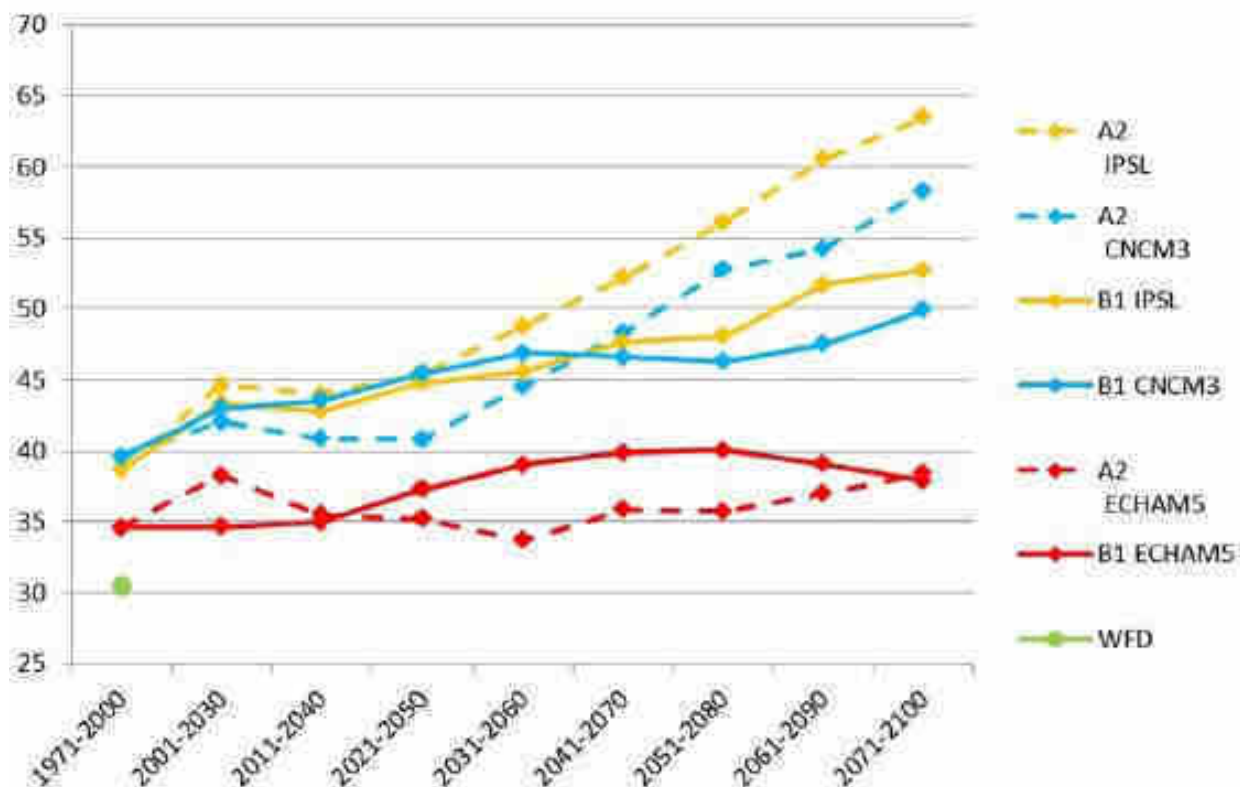


Рисунок 2.4. Изменение водообеспеченности (мм) бассейна Селенги, предсказываемое по различным сценариям и моделям общей циркуляции

Как видно из рисунка 2.4, разброс предсказываемых масштабов изменения водообеспеченности в бассейне Селенги в зависимости от выбранной модели общей циркуляции весьма велик, что не позволяет сделать его однозначную оценку. Однако тренд изменений воспроизводится моделями согласованно, и все они показывают увеличение водообеспеченности. Следует отметить, что за период с 1971 по 2000 годы сопоставление расчетов по сценариям и по данным проекта WATCH выявило тенденцию к завышению моделями общего количества осадков и водообеспеченности, что дополнительно вносит неопределенности в предсказанные оценки.

Подводя итоги, можно отметить характерную для различных методов оценки будущих изменений компонентов водного баланса согласованность в предсказании существенного увеличения среднегодовой температуры воздуха, что, в случае если эти предсказания оправдаются, приведет к деградации многолетнемерзлых пород в бассейне. Также согласованным является предсказание увеличения объема речного стока.

Глава 3. Прогноз изменений гидрологического режима рек бассейна Селенги в связи с антропогенным воздействием в XXI веке

3.1. Исходные данные для прогнозных оценок антропогенного воздействия в пределах бассейна Селенги

Для оценки среднемноголетних значений стока использованы ряды многолетних данных на постах, приведенных в таблице 3.1. Номер поста в столбце 1 соответствует номеру поста на рисунке 3.1.

Таблица 3.1. Сведения о постах на некоторых реках бассейна р. Селенга

| № г.п. | Название реки | Название поста | Расстояние от устья, км | Использованный период наблюдений, годы | Площадь водосбора, тыс. км ² | Средняя высота водосбора, м. абс. |
|--------|---------------|-------------------|-------------------------|--|---|-----------------------------------|
| 1 | Селенга | с. Хутаг | 811 | 1945–2004 | 92,3 | 1910 |
| 2 | Селенга | с. Зуунбурэн | 503 | 1975–2004 | 148 | - |
| 3 | Селенга | с. Новоселенгинск | 273 | 1932–2003 | 360 | - |
| 4 | Селенга | рзд. Мостовой | 127 | 1934–2003 | 440 | - |
| 19 | Хануй | с. Эрдэнэмандал | 176 | 1973–2004 | 4,76 | |
| 6 | Идэр | г.п. Зурх | 80 | 1961–2004 | 21,3 | 2180 |
| 7 | Дэлгэрмурэн | с. Мурэн | 66 | 1950–2004 | 189 | 2020 |
| 10 | Эг | с. Хантай | 48 | 1960–2004 | 41 | 1710 |
| 12 | Джида | ст. Джида | 21 | 1933–1935, 1939 1942–1945, 1952–2003 | 23,3 | (1200) |
| 16 | Темник | улус Улан-Удунга | 59 | 1940–1949, 1954–1968, 1971–2003 | 4,24 | 1320 |
| 21 | Орхон | с. Орхон | 432 | 1945–2011 | 36,4 | 1900 |
| 22 | Орхон | г.п. Орхонтуул | 223 | 1971–1991, 1993 1995–2004 | 96, | 1200 |
| 23 | Орхон | г. Сухэ-Батор | 25 | 1950–1957, 1959–1992, 1995–2004 | 132, | - |
| 24 | Туул | г. Улан-Батор | 547 | 1945–2011 | 6,3 | 1850 |
| 29 | Чикой | с. Поворот | 22 | 1936–1946, 1948–1950, 1952–2002 | 44,7 | 1230 |
| 37 | Хилок | з. Хайластуй | 22 | 1936–2003 | 38,3 | (990) |
| 44 | Оронгой | Оронгойский мост | 16 | 1939–1940, 1942 1947, 1950–2003 | 1,84 | 920 |
| 45 | Куйтунка | с. Тарбагатай | 12 | 1959–1998 | 1,06 | 850 |
| 48 | Уда | г. Улан-Удэ | 5,1 | 1936–1941, 1950–2003 | 34,7 | (940) |
| 57 | Итанца | с. Урунтаево | 22 | 1961–2002 | 2,12 | 920 |

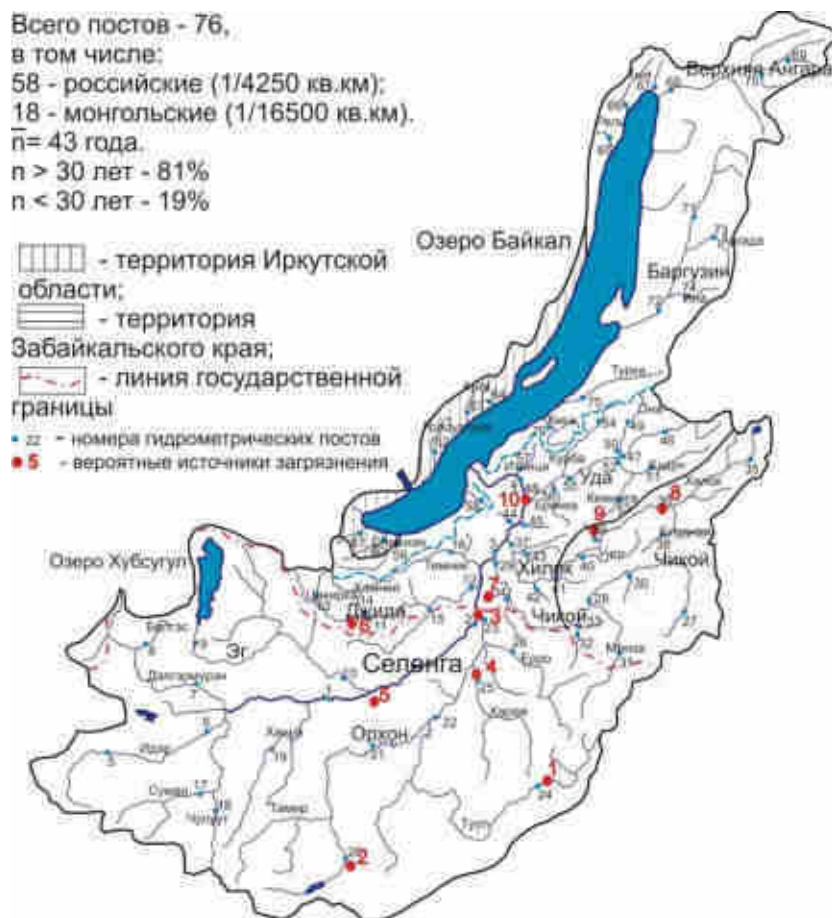


Рисунок 3.1. Расположение гидрометрических постов и наиболее вероятных источников загрязнения речных вод в бассейне оз. Байкал (по Гармаев, Христофоров, 2010).

По данным о внутригодовом изменении стока воды на постах рассчитаны доли среднемесячного стока для оценки его трансформации гидроузлами (таблица 3.2).

Таблица 3.2. Доля среднего месячного стока (% от годовой суммы) на 13 постах

| Пост | I | II | III | IV | V | VI | VII | VIII | IX | X | XI | XII |
|--------------------|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|------|-----|-----|
| Орхон | | | | | | | | | | | | |
| Сухэбатор | 0,6 | 0,4 | 0,8 | 6,8 | 10,9 | 12,0 | 17,6 | 19,4 | 16,4 | 9,9 | 4,0 | 1,2 |
| Орхон-Орхон | 0,4 | 0,3 | 1,6 | 8,6 | 8,1 | 10,8 | 20,6 | 19,7 | 14,4 | 9,4 | 4,6 | 1,5 |
| Тола-Улан-Батор | 0,0 | 0,0 | 0,2 | 2,4 | 9,6 | 14,4 | 24,2 | 24,9 | 17,2 | 5,6 | 1,3 | 0,1 |
| Сел Хутаг | 1,5 | 1,4 | 2,0 | 7,6 | 14,7 | 13,4 | 16,4 | 17,0 | 12,2 | 7,5 | 4,1 | 2,1 |
| Сел Зуунбурун | 1,6 | 1,3 | 1,8 | 8,5 | 12,1 | 11,2 | 13,6 | 17,6 | 14,0 | 10,5 | 5,4 | 2,3 |
| Дэлгэр-Мурэн-Мурэн | 0,6 | 0,5 | 0,7 | 2,8 | 20,2 | 16,8 | 18,9 | 17,1 | 12,7 | 6,7 | 2,0 | 0,9 |
| ДжидаДжида | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 3,8 | 5,8 | 8,5 | 21,0 | 26,8 | 19,1 | 8,0 | 2,8 | 1,2 |
| Темник-Улан-Удунга | 0,6 | 0,5 | 0,5 | 4,7 | 13,6 | 17,5 | 18,3 | 18,5 | 14,3 | 7,3 | 2,9 | 1,3 |
| Чикой | 1,3 | 0,9 | 0,8 | 4,3 | 11,8 | 11,3 | 18,0 | 19,5 | 16,5 | 10,2 | 3,3 | 2,1 |

| | | | | | | | | | | | | |
|----------------------|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|------|-----|-----|
| Поворот | | | | | | | | | | | | |
| Хилок Харантуй | 0,8 | 0,4 | 0,5 | 5,6 | 17,0 | 12,1 | 15,6 | 17,3 | 14,7 | 10,4 | 3,8 | 1,8 |
| Оронгой мост | 2,1 | 1,4 | 2,1 | 6,7 | 19,9 | 20,3 | 12,4 | 9,9 | 9,1 | 7,8 | 5,0 | 3,3 |
| Уда Улан-Уде | 1,8 | 1,5 | 2,1 | 6,8 | 14,3 | 12,0 | 13,7 | 14,8 | 14,8 | 10,8 | 4,6 | 2,8 |
| Итанца Турунтаево | 2,5 | 1,8 | 2,0 | 7,1 | 15,0 | 13,8 | 13,8 | 13,5 | 11,8 | 9,6 | 5,3 | 3,8 |

В работе рассмотрено ожидаемое воздействие четырех планируемых гидроузлов, сведения о которых содержатся в докладах Г. Ёндонгомбо и Б. Болдбаатар (рисунок 3.2, таблица 3.3).



Рисунок 3.2. Расположение планируемых ГЭС (по данным доклада Ин-та систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН «Оценка воздействия и рисков строительства гидроэлектростанций в бассейне р. Селенги в Монголии».

Таблица 3.3. Сведения о характеристиках проектируемых водохранилищ в бассейне р. Селенга и среднегодовых значениях составляющих водного баланса (км³/год)

| Название ГЭС | Мощность, МВт | Площадь вдхр. F км ² | Объем вдхр. W км ³ | Ср. год. расход главной реки (по данным ближайшего) | Река (пост) | Объем притока, км ³ /год | K _в , год ⁻¹ | тип регулирования | Осадки на зеркало, км ³ | Испаряемость, км ³ | Сброс ГЭС, км ³ |
|--------------|---------------|---------------------------------|-------------------------------|---|----------------------|-------------------------------------|------------------------------------|-------------------|------------------------------------|-------------------------------|----------------------------|
| Чаргайт | 24,6 | 43 | 1,09 | 35 | Дэлгэр-Мурен (Мурен) | 1,10 | 1,01 | Мног. | 0,017 | 0,025 | 1,10 |
| Эгийн | 315 | 125 | 4 | 90,3 | Эгийн-Гол (Хантай) | 2,85 | 0,71 | Мног. | 0,044 | 0,076 | 2,82 |
| Орхон | 100 | 60 | 0,7 | 39,6 | Орхон (Орхон) | 1,25 | 1,78 | Мног. | 0,018 | 0,038 | 1,23 |
| Шурен | 245 | 203 | 3,3 | 212 | Селенга (Зуунбурун) | 6,69 | 2,03 | Сез.-мног. | 0,071 | 0,123 | 6,63 |

Для расчета составляющих их водного баланса использованы карты средних многолетних величин атмосферных осадков и испаряемости воды из Атласа МВБ (Атлас... ,1974). Осадки изменяются от 300 мм/год для вдхр. Орхон до 400 мм для вдхр. Чаргайт (в докладе Ин-та систем энергетики оно именуется ГЭС Дэлгэр-Мурен по названию водотока (рисунок 3.2), однако в монгольских источниках гидроузел называется Чаргайт). Испаряемость изменяется в меньших пределах: от 590 мм/год для вдхр. Чаргайт до 630 мм/год для вдхр. Орхон (рисунок 3.3).

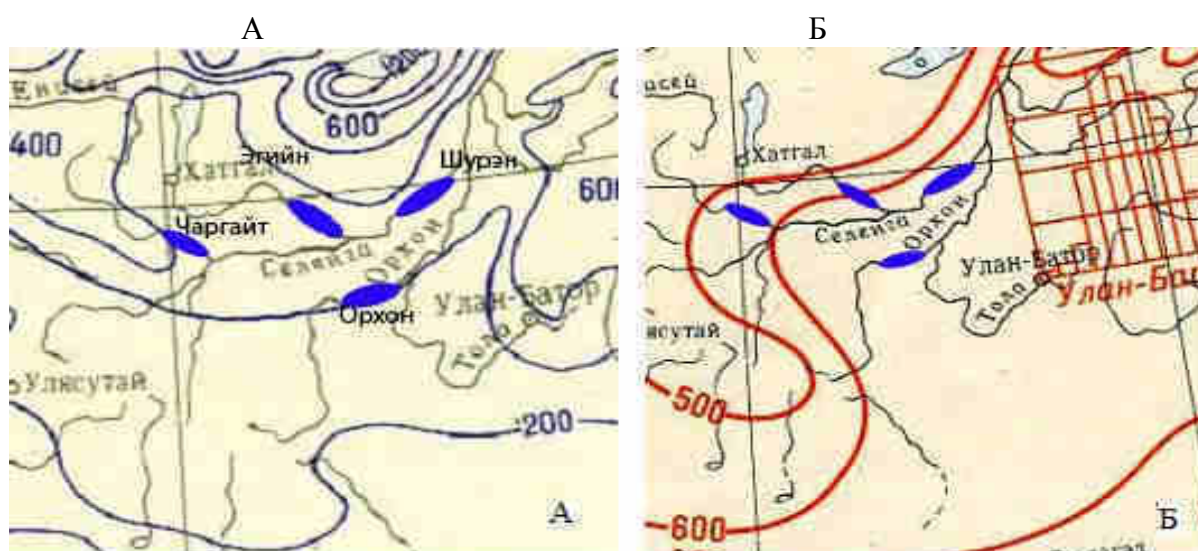


Рисунок 3.3. Слой осадков (А) и испаряемости (Б) по данным Атласа МВБ).

Учет нарушений на водосборах выполнялся на основе сценарного моделирования состояния поверхностных ландшафтов:

1. «естественное» — на основе реальных данных о современном землепользовании, имеющихся для тех лет, для которых проводились модельные климатические эксперименты.
2. «сильно измененное добычей полезных ископаемых» — на основе карты на рисунке 3.4, которая демонстрирует максимальную зону возможных нарушений поверхностных ландшафтов в Монголии к середине XXI века при проведении горных работ. Площади потенциально нарушенных земель приняты согласно сведениям о границах лицензионных участков территорий добычи полезных ископаемых (по неопубликованным данным Е.Г. Симонова, ассоциация «Реки без границ»).

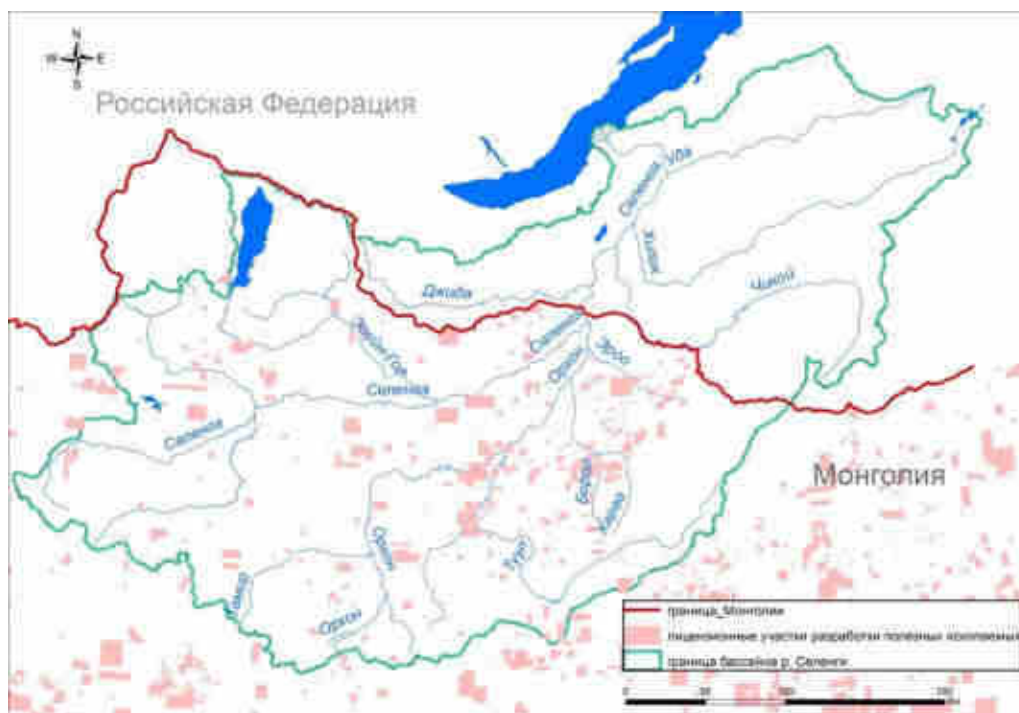


Рисунок 3.4. Зоны угле- и золотодобычи в Монголии к середине XXI века (по неопубликованным данным Е.Г. Симонова, ассоциация «Реки без границ»)

3.2. Оценка перспективных изменений водного режима р. Селенги в результате строительства ГЭС

На основе данных по стоку с ближайших постов к створам ГЭС (таблица 3.3) выявлено, что согласно значениям коэффициента водообмена, водохранилища Эгийн, Чаргайт и Орхон смогут осуществлять многолетнее регулирование стока, а водохранилище Шурен — сезонное регулирование. В результате увеличения потерь воды на испарение в речных системах при образовании водоемов (без учета потерь стока на их наполнение), сток зарегулированных рек сократится в сумме за год на $0,11 \text{ км}^3$ (Эгийн-Гол на $0,03 \text{ км}^3$, Дэлгэр-Мурен на $0,01 \text{ км}^3$, Орхон на $0,02 \text{ км}^3$, Селенги на $0,05 \text{ км}^3$), что составляет не более 0,5% от величины среднегодового стока р. Селенги вблизи устья по данным поста Мостовой, а именно 0,38% при среднегодовом расходе воды $918 \text{ м}^3/\text{с}$ в данном створе за 1934–2009 гг. и 0,5% при среднегодовом расходе воды $690 \text{ м}^3/\text{с}$ в данном створе за 1996–2009 гг. Известно, что планируется переброска стока из бассейна р. Орхон для водоснабжения добывающих производств на юго-востоке в виде трубопровода с расходом воды порядка $2,5 \text{ м}^3/\text{с}$. Это увеличит потери стока р. Орхон на $0,08 \text{ км}^3$, а всего потери с учетом видимого испарения составят 0,7–0,9% стока р. Селенга в устье. В слое

воды 0–100 м озера Байкал содержится 2894,95 км³, среднегодовой объем притока Селенги составляет при среднегодовом расходе воды 918 м³/с — 29 км³ в год, следовательно, при увеличении потерь стока на испарение с водохранилищ и водозабор в трубопровод при указанных выше величинах, снижение уровня воды составит максимум 1 см/год.

Выполнена последовательная оценка изменения стока р. Селенги и ее притоков при строительстве водохранилищ. Для водно-балансовых оценок использованы среднемноголетние данные о величине среднегодового расхода воды и среднемесячных его значений за весь имеющийся ряд наблюдений на постах. Однако, следует обратить внимание на существенное сокращение стока в бассейне р. Орхон. Отмечено, что по сравнению с периодом 1975–1995 гг. в 1996–2011 гг. сокращение стока на постах составило: Улан-Баторв 2,4 раза, Орхон в 2,9 раза, Сухэбатор в 1,56 раз. В бассейнах левых притоков Селенги (Эйгин-Гол, Дэлгэр-Мурен, Джида) такого явления не наблюдается. А для ее истока — р. Идэр и правых притоков подобное сокращение стока выражено существенно. Возможно, оно связано с усилением антропогенного воздействия и увеличения безвозвратных потерь стока в промышленности, сельском хозяйстве и коммунально-бытовом водоснабжении. Достоверные сведения об этом отсутствуют. Однако, водно-балансовая оценка выполнена, тем не менее, с использованием рядов стока максимальной длины, включающих многоводные и маловодные фазы стока.

Для расчета внутригодового изменения стока рек при отсутствии сведений о внутригодовом распределении использованы следующие аналоги: для р. Идэр (Зурх) — р. Дэлгэр-Мурэн (Мурэн), для р. Эйгин-Гол (с. Хантай) — р. Орхон (пост Сухэбаторс наиболее равномерным распределением из-за регулирующего влияния озера Хубсугул).

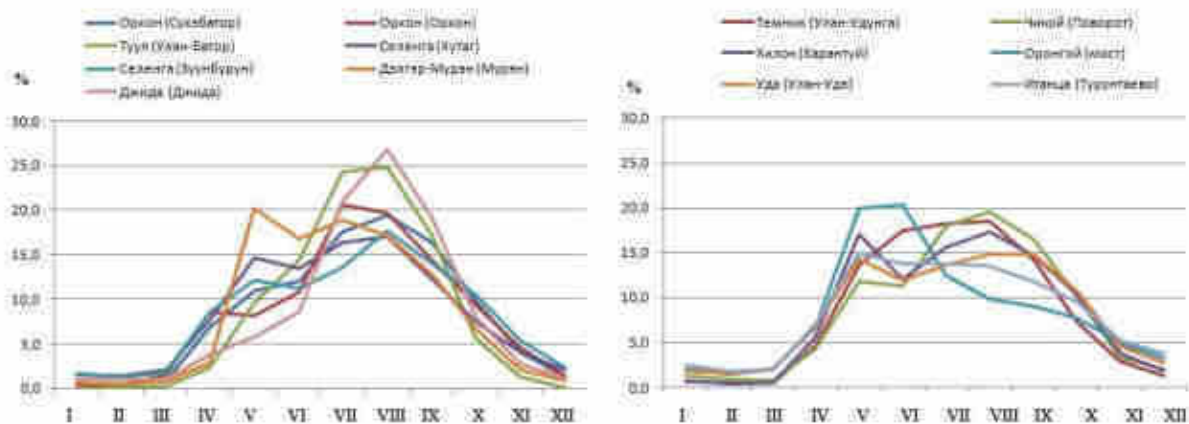


Рисунок 3.5. Внутригодовое распределение (%) среднемесячного стока рек бассейна Селенги

Согласно рисунку 3.5, наибольшей внутригодовой неравномерностью стока воды отличаются р. Джида и р. Туул. Для оценки внутригодово трансформации стока гидроузлами необходимо иметь сведения о правилах их эксплуатации, пропускной способности и данные о полезном объеме. При отсутствии этих данных в настоящей оценке примем, что полезный объем или регулирующая емкость составляет 1/3 от общего объема водохранилища. Исходя из предположения, что основная цель гидротехнического строительства — выработка электроэнергии, примем, что сброс воды в нижний бьеф будет происходить следующим образом. Наибольшее опорожнение водохранилищ будет приходиться на период до начала интенсивного притока в теплый период. Наименьший сброс в нижний бьеф не будет ниже минимального среднемесячного. Наибольший объем в водохранилище будет накоплен после периода наибольшей водности для равномерного сброса в маловодный холодный период. При таких допущениях выполнена оценка трансформации стока проектируемыми гидроузлами.

3.2.1. Потенциальное изменение стока воды водохранилищем Чаргайт

На рисунке 3.6. показано внутригодовое изменение стока р. Дэлгэр-Мурен и его потенциальная трансформация.

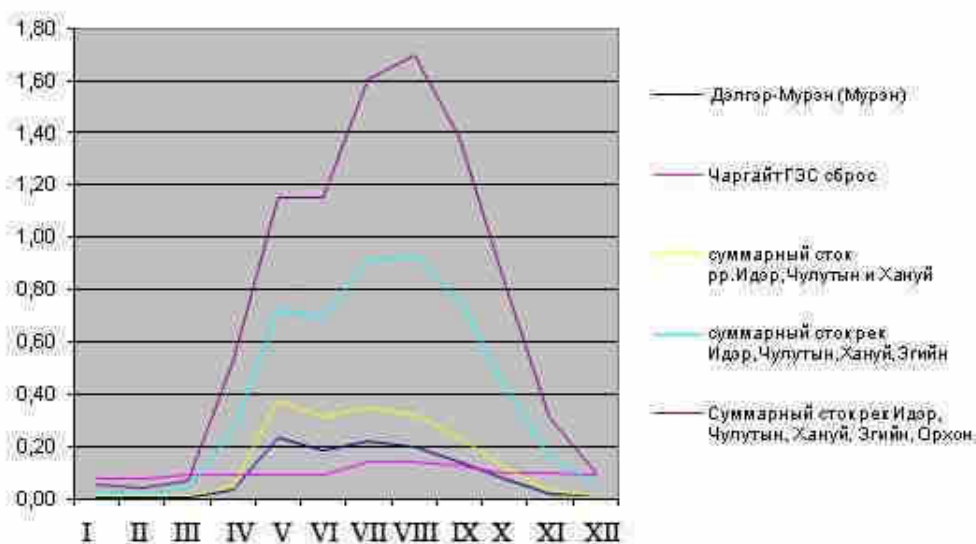


Рисунок 3.6. Вероятные среднемесячные значения сброса воды в нижний бьеф водохранилища Чаргайт и нарастающего стока Селенги (км³/мес) вследствие его смешения с водами увеличивающегося числа ее притоков на территории Монголии

В створе реки, где расход воды становится соизмерим с удвоенным расходом сброса ГЭС, можно считать, что в речном русле происходит превращение основной водной массы (ОВМ) водохранилища в трансформированную ею речную водную массу (ТВМ), главным очагом формирования которой становится часть бассейна речной системы, расположенная ниже створа гидроузла. За счет поступления воды незарегулированных притоков, несущих водные массы, характерные для данной зоны, постепенно восстанавливается водный, термический, химический режим зарегулированной реки, восстанавливается сток наносов.

При завершении строительстве гидроузла Чаргайт изменение режима стока р. Селенги влияние его водохранилища (при условии удвоения объема сброса поступлением вод притоков) будет нивелировано в теплый период суммарным стоком рек Идэр, Чулутын и Хануй, однако стока период с октября по апрель при работе гидроузла будет увеличен на порядок из-за низкого стока в зимнюю межень. Впадение р. Эгийн-Гол еще больше восстановит естественный режим стока, однако с декабря по март сток воды Селенги с учетом регулирования станет больше природных значений в 2–3 раза. Впадение р. Орхон еще сильнее восстановит зональные характеристики стока воды р. Селенги, однако в январе-марте удвоения стока воды так и не произойдет. Следовательно у границы с Российской Федерацией работа гидроузла будет проявляться в увеличении низкого зимнего стока воды до двух раз в период с января по март.

3.2.2. Потенциальное изменение стока воды водохранилищем Эгийн

Влияние сооружения гидроузла Эгийн рассмотрим с учетом зарегулирования р. Дэлгэр-Мурэн и без него. Водоохранилище Эгийн будет иметь наибольший полный (соответственно и полезный) объем из всех четырех проектируемых, следовательно при опорожнении регулирующей емкости перед наступлением многоводного периода водных ресурсов достаточно для обеспечения равномерного сброса воды для наполнения этого водоема до НПУ и последующей их стратотки.

На рисунке 3.7 видно, что 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 через ГЭС значительно превысят сток в маловодную межень. Впадение притока Орхон будет восстанавливать зональные характеристики стока за более длинный период — с апреля по октябрь, в остальные 5

месяцев сброс Эгийн через ГЭС может превышать суммарный сток притоков Селенги, формирующих ее сток до граничного створа.

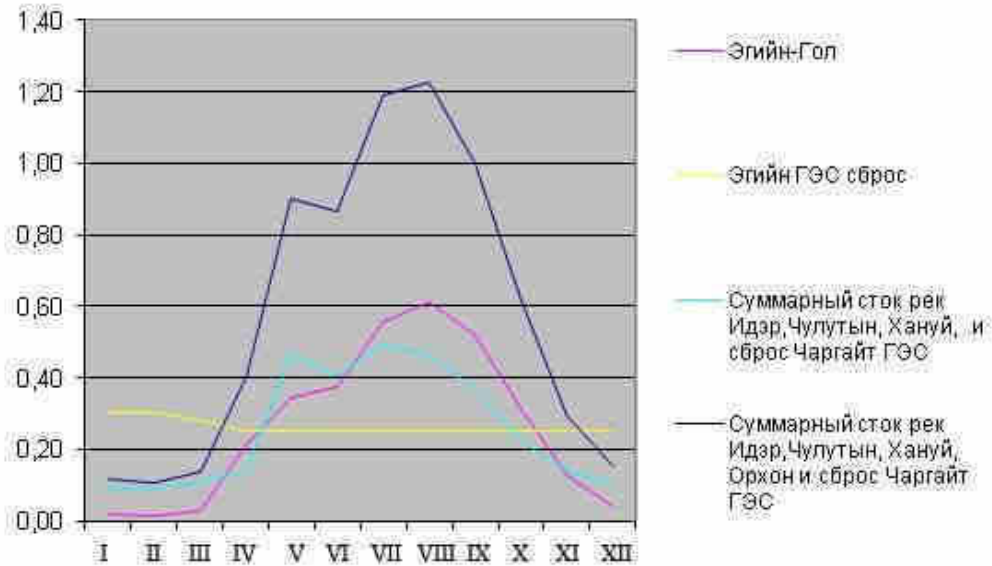


Рисунок 3.7. Среднемесячные значения сброса воды в нижний бьеф водохранилища Эгийн и нарастающая сумма стока притоков Селенги (км³/мес.)

На рисунке 3.8 показан внутригодовой ход стока воды р. Селенга в створе Наушки, расположенном вблизи границы государств, и возможное внутригодовое распределение стока с учетом работы обоих гидроузлов Чаргайт и Эгийн (красная линия) и только Эгийн ГЭС (зеленая линия).

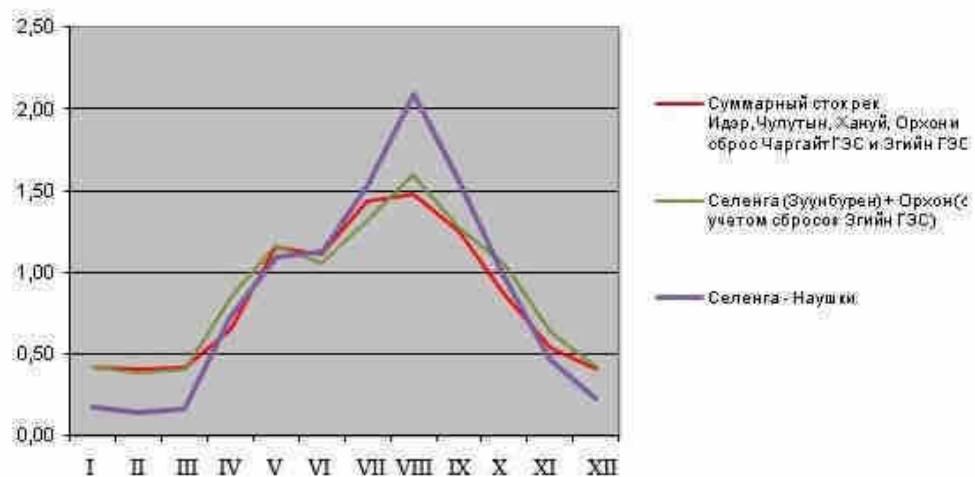


Рисунок 3.8. Сравнение природного стока р. Селенга в створе Наушки и трансформированного стока с учетом работы гидроузлов в этом же створе (км³/мес.)

Видно, что при введении в эксплуатацию гидроузлов низкий зимний сток р. Селенга на границе с РФ увеличится в 2-3 раза, а уменьшение стока будет наиболее существенным (на 20-30%) в августе-сентябре. На рисунке 3.7 показана также трансформация стока р. Селенга при отсутствии водохранилища на притоке Дэлгэр-Мурен. Это значит, что до створа Зуунбурэн сток Селенги остается природным. В этом случае наибольшие различия с вариантом работы двух гидроузлов составят в меньшем всего на 0,1 км³/мес. максимального летнего стока.

3.2.3. Потенциальное изменение стока воды водохранилищем Орхон

Возможные изменения стока р. Орхон после сооружения гидроузла выше слияния с р. Туул проведены с учетом стока р. Туул, рассчитанного по разнице на створах Орхон и Орхонтуул. На рисунке 3.9 видно, что при впадении притока Туул водность реки в створе Орхонтуул увеличивается в 2 раза по сравнению со створом Орхон. Этот приток приносит объем воды соизмеримый со стоком гидроузла за период с апреля по октябрь, т.е. зональные особенности стока могут восстановиться (хотя следует иметь ввиду сокращение стока воды в его бассейне, которое было отмечено выше; возможно оно связано с увеличившимся водопотреблением). К устью р. Орхон (створ Сухэбатор) увеличение стока за этот период выражено еще больше, но в зимние месяцы (в декабре по февраль) сбросы ГЭС Орхон будут в 2-4 раза превышать природный меженный сток.

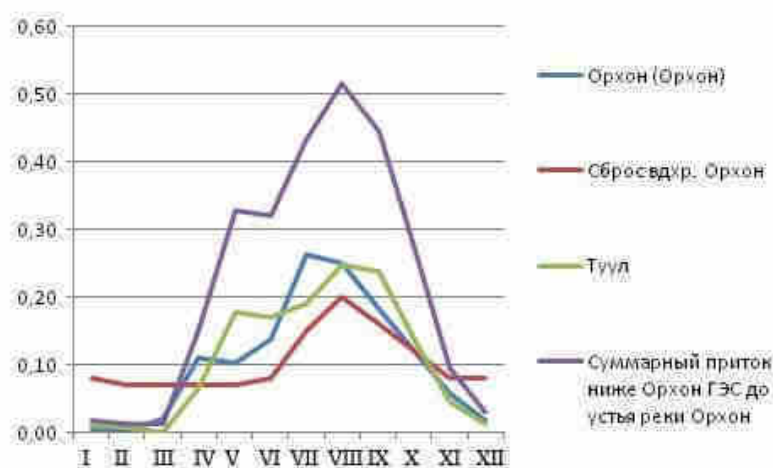


Рисунок 3.9. Среднемесячные значения сброса воды в нижний бьеф водохранилища Орхон и нарастающий сток к устью р. Орхон (км³/мес.)

На рисунке 3.10 показана трансформация стока р. Селенги к приграничному створу Наушки в случае регулирования одним водохранилищем Орхон при природном режиме

притока других рек бассейна Селенги и результирующее влияние трех гидроузлов (Чаргайт, Эгийн и Орхон).

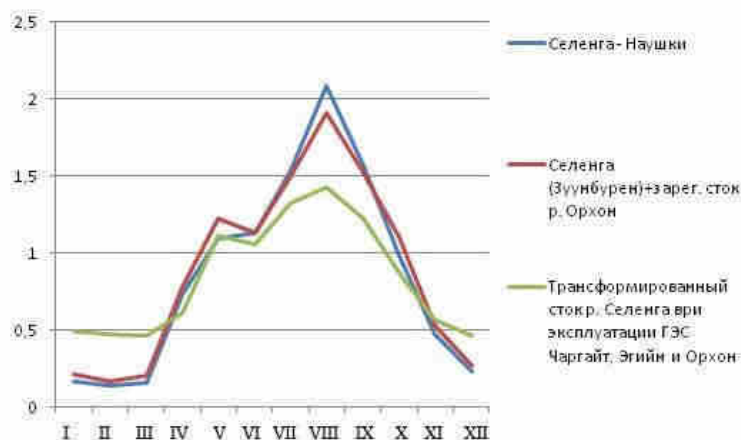


Рисунок 3.10. Возможная трансформация стока р. Селенги в створе Наушки при работе только гидроузла Орхон и при регулировании стока тремя гидроузлами на притоках (км³)

Гидроузел Орхон при одиночном воздействии увеличит зимний сток на 0,03–0,06 км³/мес. (на 15–20%) и уменьшит сток в июле-сентябре (максимаксимально в августе — на 0,18 км³/мес. или 8%). Суммарное воздействие трех гидроузлов существенно сократит размах колебаний среднемесячных величин стока Селенги у границы — с 1,95 до 0,96 км³/мес., увеличив зимний меженный сток в 2–3 раза и сократив максимальный летний в 1,5 раз.

3.2.4. Потенциальное изменение стока воды водохранилищем Шурэн

Рассмотрим, наконец, возможную трансформацию стока Селенги при осуществлении проекта ГЭС Шурэн в ее долине. Расчеты выполнены для створа, обозначенного на рисунке 3.2 при характеристиках, указанных в таблице 3.3, хотя рассматривается несколько вариантов местоположения ГЭС. На рисунке 3.11 видно, что удвоение зарегулированного стока Селенги при впадении в нее р. Орхон, имеющим природный гидрологический режим, произойдет только в мае-июле, а с учетом его регулирования только в мае, следовательно восстановление зональных характеристик стока к граничному створу сомнительно.

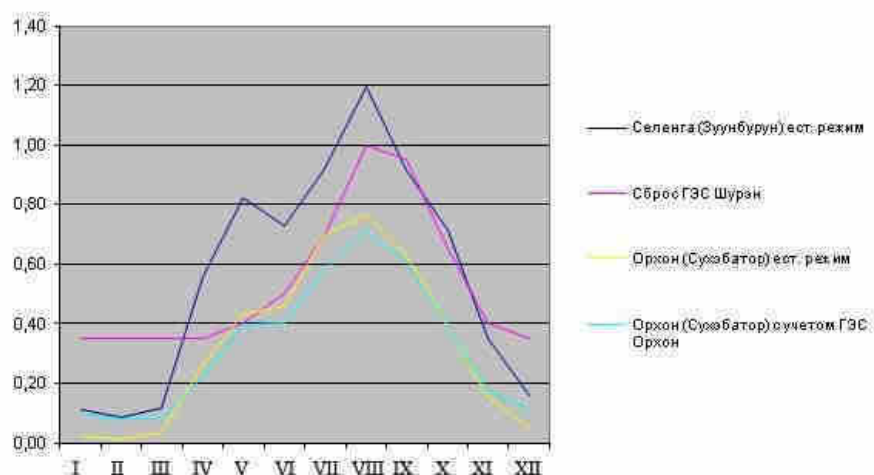


Рисунок 3.11. Среднемесячные значения сброса воды в нижний бьеф водохранилища Шурэн исток р. Орхон (км³/мес.)

Рассмотрим влияние притоков Селенги на территории РФ (рисунок 3.12).

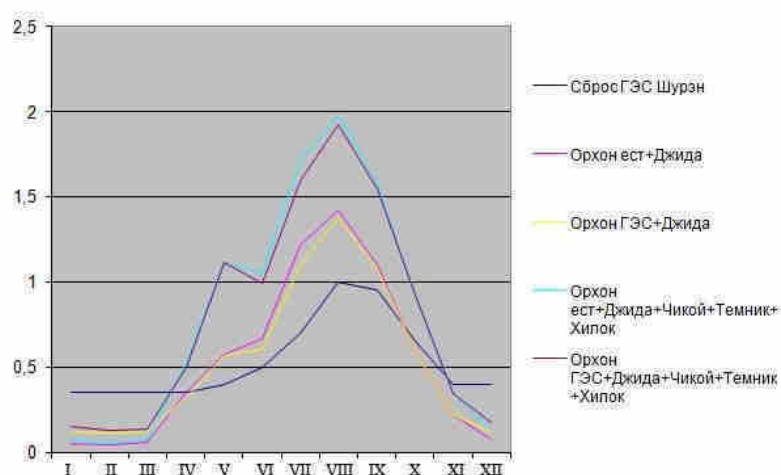


Рисунок 3.12. Среднемесячные значения сброса воды в нижний бьеф водохранилища Шурэн и нарастание стока по длине р. Селенга (км³/мес.)

С учетом притока воды по р. Джида и р. Орхон в природном и зарегулированном режиме превышение стока ниже Шурэн ГЭС будет происходить только в мае-сентябре. При впадении наиболее полноводных притоков Чикой и Хилок превышение притока ниже гидроузла над сбросом возможно уже в апреле-октябре, однако зимний сток по-прежнему остается сильно трансформированным — сброс ГЭС в 2,3–2,7 раз может превышать суммарный сток притоков от Орхона до Хилока (рисунок 3.12).

На рисунке 3.13 показано, что суммарного стока всех притоков Селенги на территории РФ с января по март недостаточно для двойного разбавления водной массы

водохранилища, и в селенгинском русле будет течь водохранилищная вода несколько трансформированная речными водами, поэтому характеристики ее состава будут отличными от природного, наблюдаемого в настоящее время.

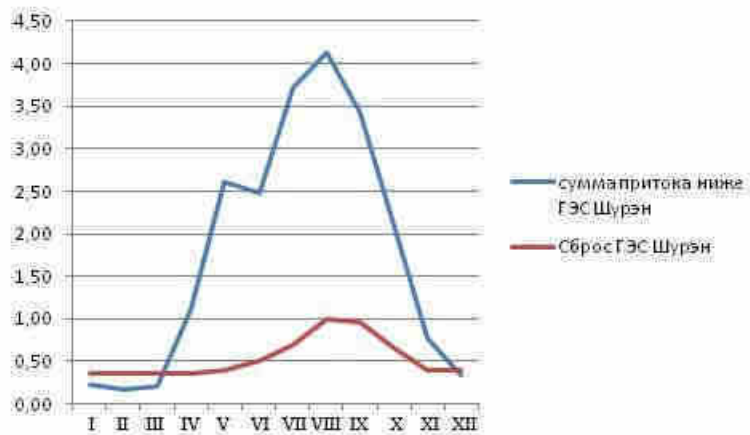


Рисунок 3.13. Сброс Шурэн ГЭС и суммарный сток притоков р. Селенга ниже гидроузла до устья реки

С учетом всех притоков трансформацию стока Селенги в устье (створ Мостовой) характеризует рисунок 3.14. Видно, что учет влияния ГЭС Орхон незначительно меняет общую картину, поскольку наибольшую трансформацию все же вносит регулирование стока главной реки. В итоге эксплуатация гидроузла энергетического назначения будет уменьшать внутригодовые колебания стока реки в 1,12–1,15 раз, сокращая максимальный среднемесячный сток на 5–6%, увеличивая минимальный зимний на 57–63%. 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.

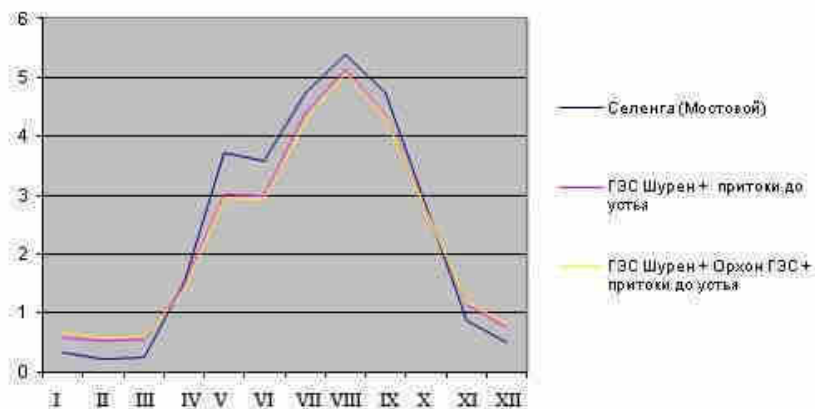


Рисунок 3.14. Влияние водохранилища на месячный сток в устьевом створе Селенги

3.3. Влияние антропогенной нагрузки на мезо-климатические особенности бассейна реки Селенги (путем регионального моделирования)

Для прогноза возможных региональных изменений водного баланса в связи с антропогенным освоением территории использована модель COSMO-CLM. По форме решаемых уравнений модель COSMO-CLM относится к категории негидростатических моделей. Это значит, что для третьего уравнения движения приближение статики атмосферы не выполняется, что позволяет модели частично воспроизводить конвективные явления и обеспечивает возможность ее применения с пространственным разрешением до 1 км.

Использованный в данном исследовании домен (область моделирования) показан на рисунке 3.15. Базовый домен для расчетов «коротких» экспериментов имеет разрешение $0,15^\circ$ в повернутой системе координат, что примерно соответствует 13 км с центром в районе географического центра страны. Для «климатического эксперимента» разрешение домена составляло $0,25^\circ$. Выбор такой области вызван акцентом на изучение способности модели самостоятельно воспроизводить крупномасштабные процессы на территории Монголии, без жесткой привязки к граничным условиям. Разрешение модельной области определяло выбор шага по времени: его значение задавалось равным 75 секундам для каждого типа экспериментов.

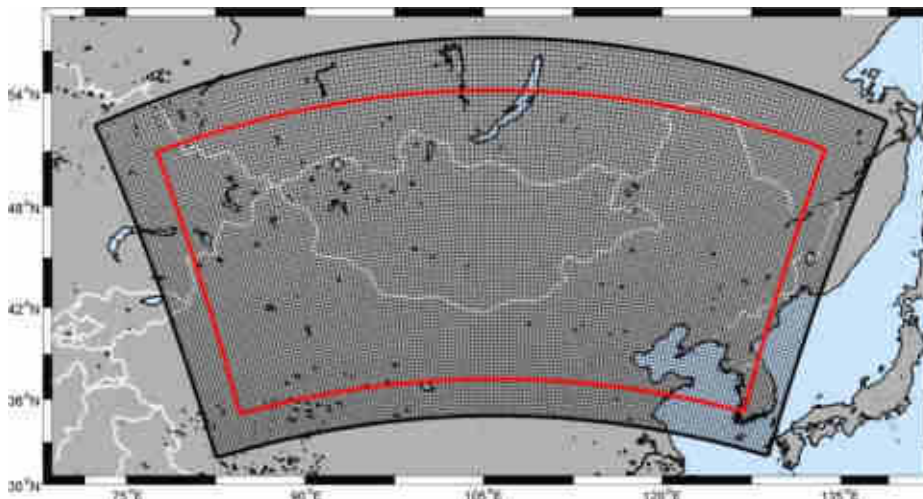


Рисунок 3.15. Модельная область (домен), использованная в исследовании

В качестве начальных и граничных условий для базовых модельных экспериментов для базового домена использовались данные реанализа ERA Interim, выпускаемые

Европейским центром среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF), имеющие пространственное разрешение порядка $0,7^\circ$ по широте и долготе и 60 вертикальных уровней, построенных на основе данных глобального моделирования с четырехмерным усвоением данных наблюдений. Временное разрешение данных реанализа, использовавшихся для задания граничных условий, составляло 6 часов. Слабым местом данных реанализа в контексте климатических исследований является малая глубина охватываемого слоя подстилающей поверхности — он включает в себя данные по влажности и температуре почвы для слоя толщиной порядка 1 м, что существенно меньше толщины почвенного слоя в модели, и при инициализации которой влажность всех нижележащих слоев задается равной влажности нижнего уровня данных реанализа, что не всегда корректно.

Для более точной оценки реакции регионального климата были проведены эксперименты для двух временных периодов, резко контрастирующих между собой по условиям увлажнения (по стоку р. Селенги) (Марченко, 2013) . В качестве «сухого периода» был выбран летний период (июнь-август) 1979 года, а «влажного периода» — летний период 1985 года соответственно. Также проводился расчет и для непрерывного периода с мая 2004 года по август 2012 года (условный «климатический эксперимент»).

Для каждого из этих периодов были проведены модельные эксперименты в рамках двух вышеописанных сценариев антропогенного изменения ландшафтов. В самой модели COSMO-CLM зоны разработок полезных ископаемых описывались путем уменьшения значений коротковолнового альбедо земной поверхности с исходных (для невозмущенного ландшафта) 25–35% до 10% в пределах ареалов угледобычи (см подробнее ниже).

Для задания подстилающей поверхности в модели требуется информация о более чем 15 ее параметрах, ключевые из которых приведены в таблице 3.4. Данные, содержащие эти параметры, задаются в модели с помощью специального файла в формате NetCDF.

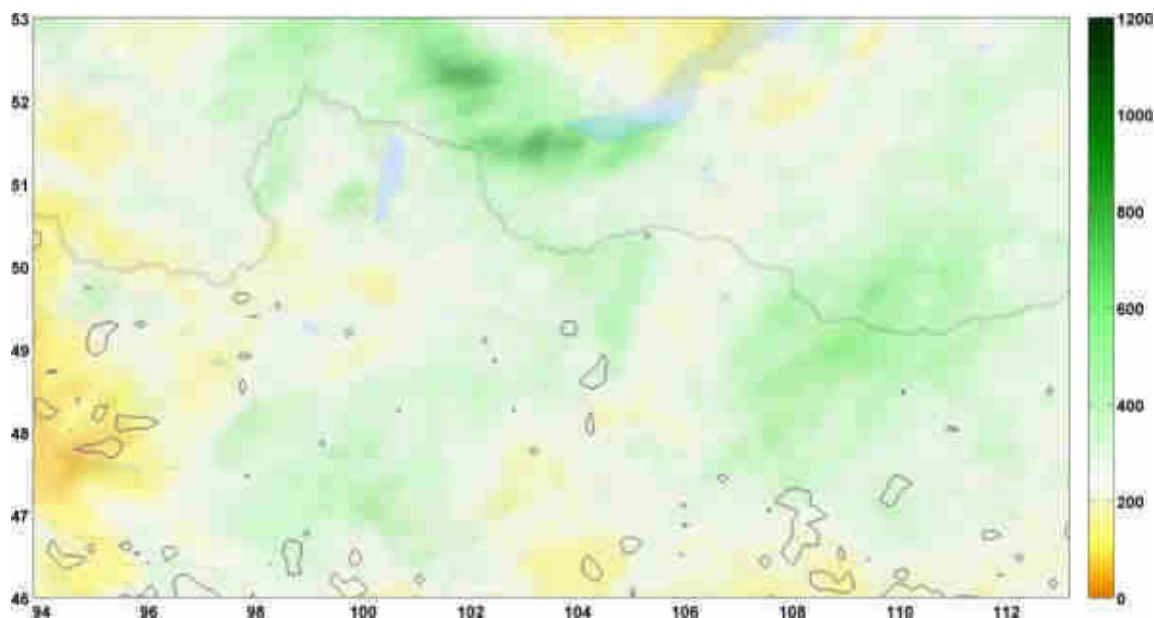
Таблица 3.4. Параметры подстилающей поверхности, требующиеся для модели COSMO-CLM

| Название параметра | Описание |
|--------------------|----------------------------|
| FR_LAND | Доля суши в площади ячейки |

| | |
|---|--|
| ZO | Параметр шероховатости подстилающей поверхности |
| SOILTYP | Тип почвы |
| PLCOV | Доля площади ячейки, занятая растительностью |
| LAI | Индекс листовой поверхности (Leaf area index) |
| FOR_D, FOR_E | Доли опадающих и вечнозеленых лесов в площади ячейки |
| ROOTDP | Глубина корней растительности |
| SSO_STDH, SSO_GAMMA, SSO_THETA, SSO_SIGMA | Параметры подсеточной орографии |
| HSURF | Высота ячейки над уровнем моря |
| T_CL | «Климатологическая» температура почвы на нижней границе деятельного слоя |
| ALB_DRY | Альbedo сухой почвы |
| ALB_SAT | Альbedo насыщенной почвы |

По итогам проведенных вычислительных экспериментов для бассейна р. Селенги были получены следующие поля суммарных летних осадков для соответственно «сухого 1979 года » и «влажного 1985 года».

1979 год:



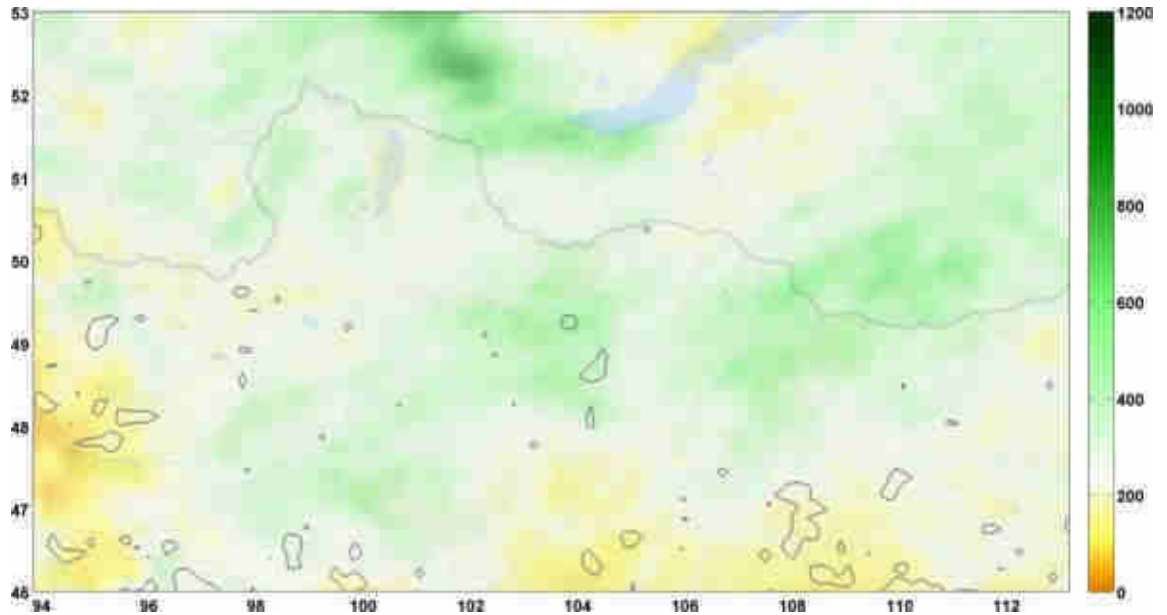
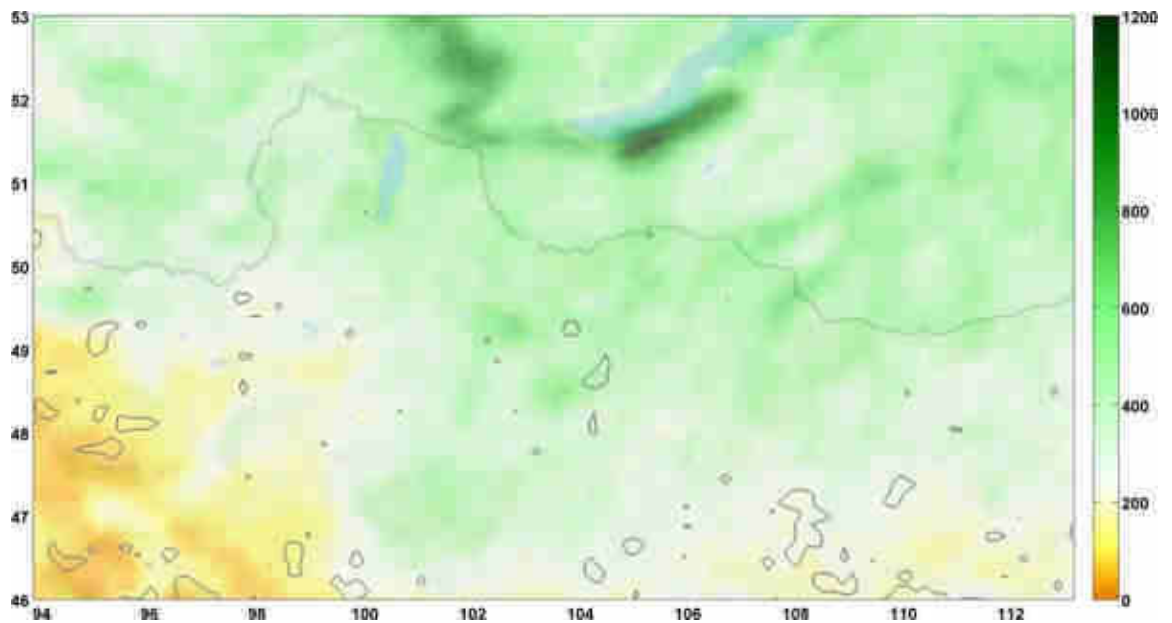


Рисунок 3.16. Сумма летних осадков для сухого климатического события (июнь-август 1979 года). На верхнем рисунке — для эксперимента с естественным ландшафтом, на нижнем — с ландшафтом, измененным потенциальной угле- и золотодобычей

1985 год:



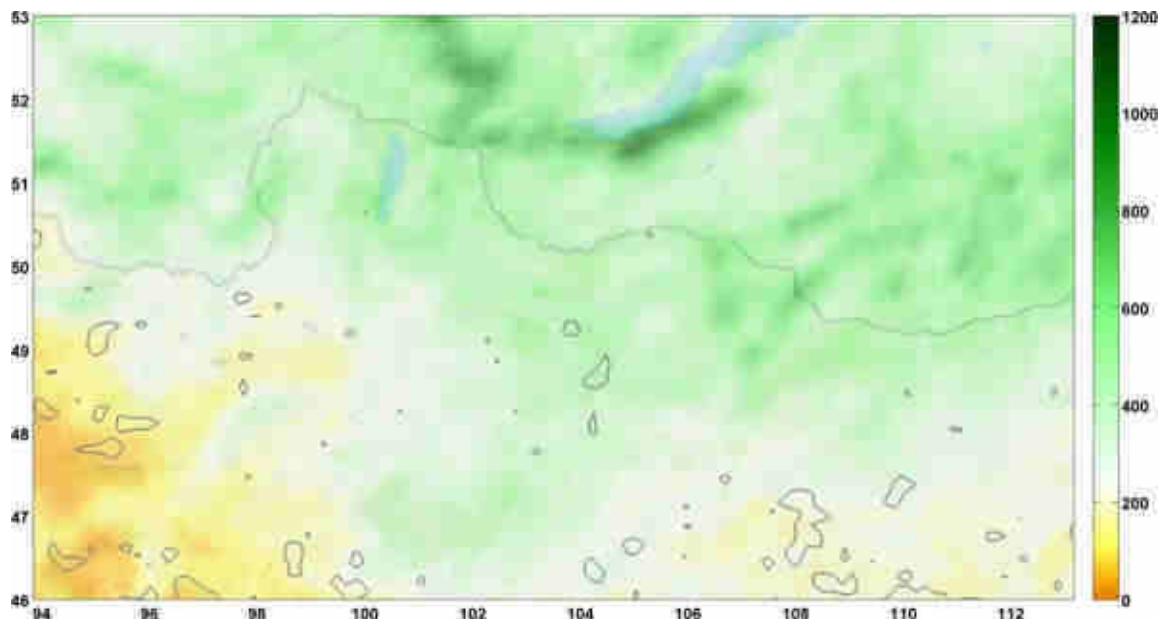


Рисунок 3.17. Сумма летних осадков для влажного климатического события (июнь-август 1985 года). На верхнем рисунке — для эксперимента с естественным ландшафтом, на нижнем — с ландшафтом, измененным потенциальной угле- и золотодобычей

На первый взгляд, исходя из рисунка 3.16 и рисунка 3.17 основные районы выпадения заметных осадков (до 1200 мм за лето) и рисунок их пространственного распределения заметно не изменились из-за увеличения антропогенной нагрузки ни в «сухой 1979» год, ни в «влажный 1985». Заметно лишь уменьшение осадков в районе южного побережья Байкала в «антропогенно измененных» сценариях, как для сухих, так и для влажных периодов.

Для удобства данные итоговые данные расчета просуммированы в таблицу 3.5 и таблицу 3.6.

Таблица 3.5. Смоделированные климатологические параметры для сценария неизменных ландшафтов и сценария антропогенно измененного ландшафта для «засушливого» 1979 года

| | 1979 (засушливый год) | | | |
|--|-----------------------------|----------------------------------|-------------------------------|----------------------------------|
| | Сумма летних осадков, ΣР мм | | Средняя температура лета t° С | |
| | Природный сценарий | Антропогенно измененный сценарий | Природный сценарий | Антропогенно измененный сценарий |
| Регион 100-109 в.д., 41-44.5 с.ш. (район максимального изменения землепользования на юге Монголии) | 120 | 154 | 22,2 | 22,0 |

| | | | | |
|---|-----|-----|------|------|
| Регион 94-98 в.д., 44-46 с.ш. (район максимального изменения землепользования на юге-западе Монголии) | 183 | 222 | 18,7 | 18,6 |
| Бассейн Селенги (97-110 в.д., 46-53 с.ш.) | 315 | 306 | 14,4 | 14,5 |

Таблица 3.6. Смоделированные климатологические параметры для сценария неизменных ландшафтов и сценария антропогенно измененного ландшафта для «влажного» 1985 года

| | 1985 (влажный год) | | | |
|---|-----------------------------|----------------------------------|------------------------------|----------------------------------|
| | Сумма летних осадков, ΣР мм | | Средняя температура лета t°C | |
| | Природный сценарий | Антропогенно измененный сценарий | Природный сценарий | Антропогенно измененный сценарий |
| Регион 100-109 в.д., 41-44.5 с.ш. (район максимального изменения землепользования на юге Монголии) | 71 | 77 | 23,25 | 23,5 |
| Регион 94-98 в.д., 44-46 с.ш. (район максимального изменения землепользования на юге-западе Монголии) | 35 | 36 | 19,3 | 19,5 |
| Бассейн Селенги (97-110 в.д., 46-53 с.ш.) | 393 | 390 | 13,0 | 13,0 |

Эти таблицы показывают осредненные по территории значения для суммарного летнего количества осадков и средней температуры воздуха за тот же период.

Для «засушливого» 1979 года характерна заметная разница в смоделированных значениях температуры воздуха и количества осадков для территорий с высоким процентом антропогенно измененных ландшафтов (юг и юго-запад Монголии). В обоих регионах изменение ландшафта вызывает увеличение летних осадков (до 20%) и понижение летней температуры воздуха (до 0,2 градуса Цельсия). Для бассейна заметных изменений не наблюдается, что, по-видимому, связано с отсутствием влияния измененных ландшафтов на районы Северной Монголии.

Для «влажного» 1985 года следует отметить отсутствие изменений в количестве осадков между сценариями для территорий с высоким процентом антропогенно измененных ландшафтов (юг и юго-запад Монголии). Любопытно, что здесь летнее количество осадков относительно «сухого» 1979 года в несколько раз ниже, то есть для юга Монголии 1985 год не является «влажным», в отличие от бассейна Селенги. А вот температура воздуха показывает совершенно иной тренд, нежели отмеченный для 1979 года — в отдельных районах юга страны она повысилась на 0,2–0,25 градуса Цельсия. Это можно объяснить более отчетливым влиянием понижения альбедо поверхности на ее термический режим в сухие (для юга Монголии, конечно же) периоды. Для бассейна Селенги в 1985 году по-прежнему значимых изменений в погодных условиях летнего периода, в целом, не отмечено.

Эксперименты для «климатического» периода

По итогам более продолжительного вычислительного эксперимента (проводилось непрерывное моделирование с 2004 по 2012 год) были получены следующие результаты (рисунок 3.18 и рисунок 3.19, а также таблица 3.7):

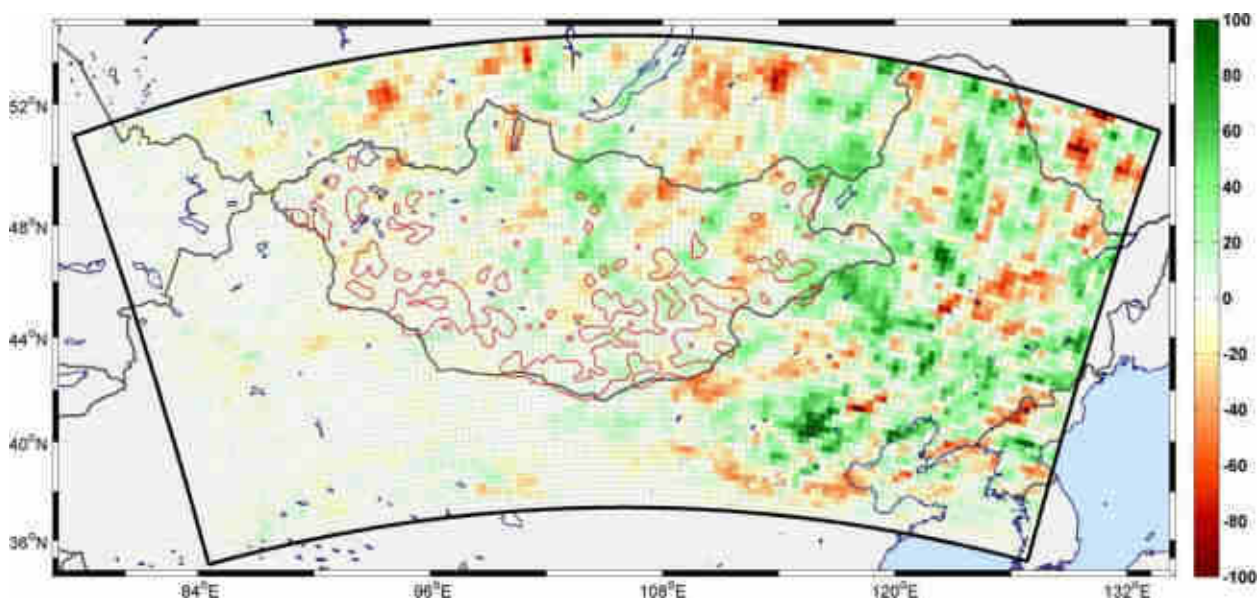


Рисунок 3.18. Разность среднегодовых сумм осадков для периода 2004–2012 гг. между экспериментом с ландшафтом, измененным угле- и золотодобычей и экспериментом с естественным ландшафтом ($\Delta P = P_{\text{антропоген. сценарий}} - P_{\text{естеств. сценарий}}$)

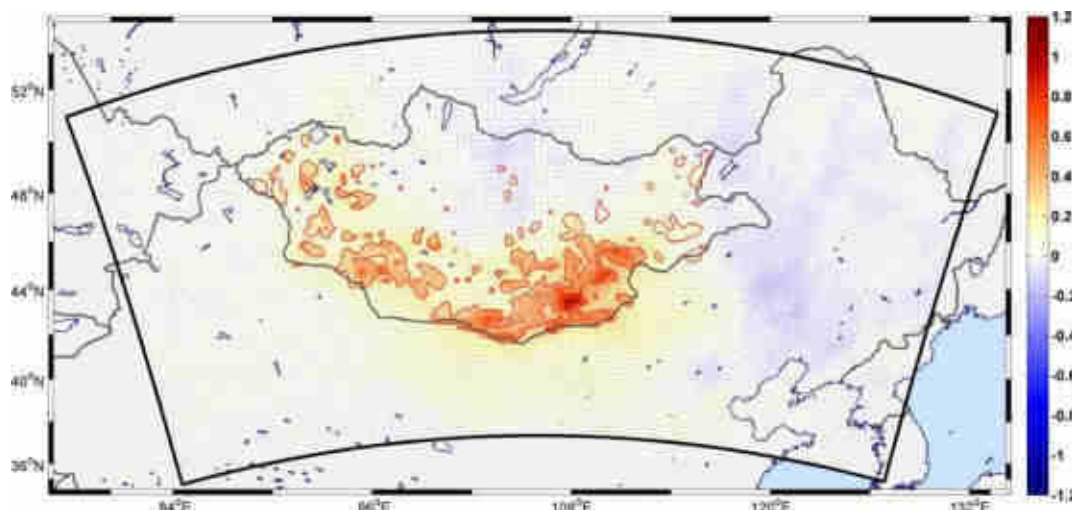


Рисунок 3.19. Разность среднегодовых температур для периода 2004–2012 гг. между экспериментом с ландшафтом, измененным угле- и золотодобычей и экспериментом с естественным ландшафтом ($\Delta T = T_{\text{антропоген. сценарий}} - T_{\text{естеств. сценарий}}$). Изолиниями обведены районы, где изменение альbedo превысило 5%

Таблица 3.7. Смоделированные климатологические параметры для сценария неизменных ландшафтов и сценария антропогенно измененного ландшафта для периода 2004–2012 гг.

| | 2004–2012 «климатический» эксперимент | | | |
|---|---------------------------------------|----------------------------------|---|----------------------------------|
| | Сумма годовых осадков, ΣP мм | | Среднегодовая температура $t^{\circ}\text{C}$ | |
| | Природный сценарий | Антропогенно измененный сценарий | Природный сценарий | Антропогенно измененный сценарий |
| Регион 100-109 в.д., 41-44.5 с.ш. (район максимального изменения землепользования на юге Монголии) | 89 | 91 | 7,9 | 8,2 |
| Регион 94-98 в.д., 44-46 с.ш. (район максимального изменения землепользования на юго-западе Монголии) | 89 | 89 | 4,7 | 5,0 |
| Бассейн Селенги (97-110 в.д., 46-53 с.ш.) | 461 | 462 | -0,7 | -0,7 |

На рисунке 3.18 явно заметна разница в полях осадков для различных сценариев ландшафтных преобразований (пятнистость полей осадков привязана к рельефу, но местами разница достигает до 80–100 мм осадков как в областях с сухими аномалиями, так и в областях с дождливыми аномалиями). Предсказать, как эти аномалии скажутся на

стоке Селенги и отдельных ее притоков возможно только при использовании моделей формирования стока (например ECOMAG) (Gelfan, Motovilov, 2009), поскольку высокая мозаичность сухих и влажных районов, особенно в восточной части домена видна невооруженным глазом.

Однако, осредненные значения как по всему бассейну Селенги (таблица 3.7), так и по районам максимального изменения ландшафтных характеристик не показывают практически никакого изменения среднегодовых сумм осадков — главным образом за счет взаимного наложения аномалий разного знака.

Также не проявляется в бассейне Селенги на годовом масштабе осреднения и температурный отклик на изменения ландшафтов южной Монголии. А вот непосредственно в районах угле- и золотодобычи среднегодовая температура увеличивается на 0,3 градуса, что, впрочем, вполне ожидаемо. Это лишний раз демонстрирует, что физически обоснованный отклик температуры на изменения альbedo на локальном масштабе наблюдается и в данном исследовании.

Глава 4. Разработка инструментария для проведения комплексных оценок изменений гидрологического режима рек бассейна Селенги

4.1. Разработка бассейновой модели формирования стока Ecomag для бассейна р. Селенга

Моделирование формирования речного стока в бассейне р. Селенга было осуществлено на базе программного комплекса гидрологической модели ECOMAG, разработанной в ИВП РАН Ю.Г. Мотовиловым (Motovilovetal., 1999a, б).

Модель построена в соответствии со следующей схемой принимаемых во внимание процессов. В летний период выпадающие осадки в виде дождя частично проникают в почву. Избыток воды, не поглощенный почвой, после заполнения депрессий на поверхности бассейна перемещается по уклону поверхности в речную сеть. Часть влаги, впитавшейся в почву, может перемещаться по уклону по временным относительно непроницаемым водоупорам. Вода, не попавшая в речную сеть, расходуется на испарение или дренаж в более глубокие горизонты почвы. В холодный период года рассматриваемая схема дополняется учетом гидротермических процессов в снежном покрове и почве (формирование снежного покрова и снеготаяние, промерзание и оттаивание почвы, инфильтрации талых вод в мерзлую почву).

Пространственная структура модели ECOMAG базируется на принципах ландшафтных единиц, называемых «элементы». Их структура позволяет отразить пространственные неоднородности рельефа, почв, землепользования, строения гидрографической сети, а также учесть пространственные особенности полей внешних гидрометеорологических воздействий.

При модельной схематизации речного бассейна его поверхность разделяется регулярной или нерегулярной сеткой на отдельные ландшафтные элементы с учетом особенностей рельефа, структуры речной сети, местоположения типов почв, растительности, землепользования и т.д. (Рисунок 4.1).

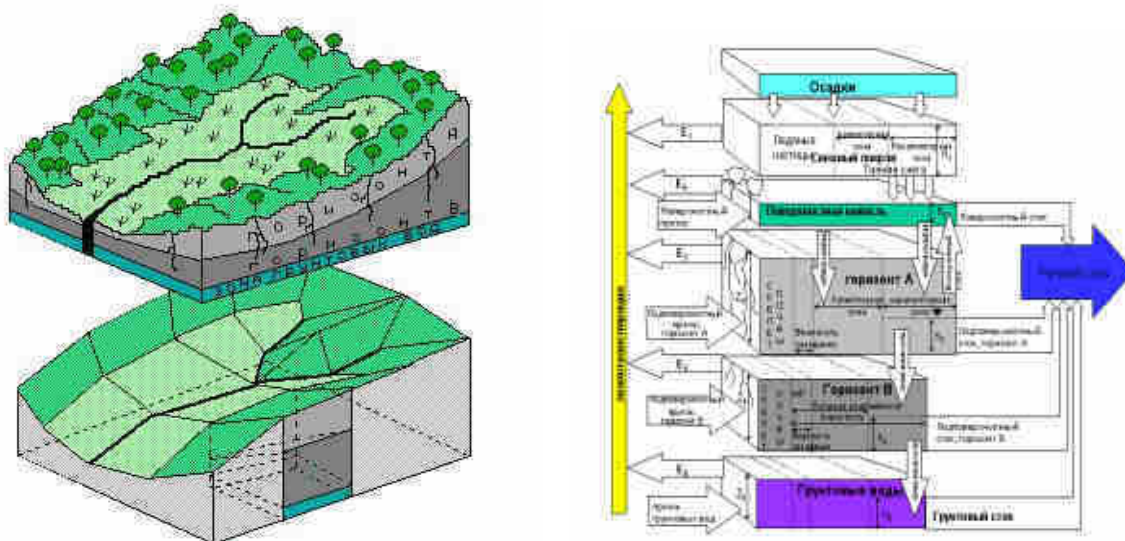


Рисунок 4.1. Схематизация речного бассейна и структура гидрологической модели для элементарной площадки

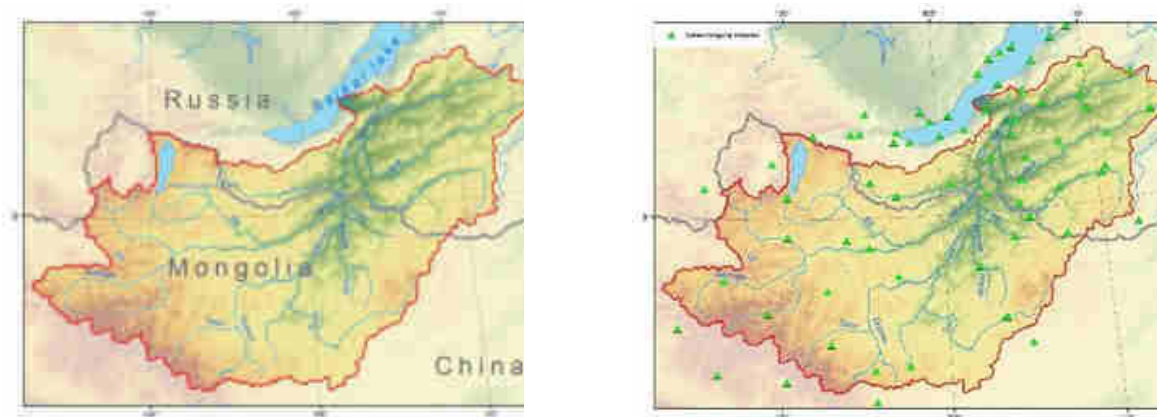
Моделирование гидрологических процессов на каждом ландшафтном элементе выполняется для четырех уровней: для поверхностного слоя почвы (горизонт А), подстилающего его более глубокого слоя (горизонт В), емкости грунтовых вод и емкости в зоне формирования поверхностного стока. В холодный период добавляется емкость снежного покрова. Схема заканчивается рассмотрением процессов трансформации воды в речной сети.

Основные уравнения модели ECOMAG, описывающие процессы гидрологического цикла обыкновенными дифференциальными уравнениями, получены путем интегрирования по пространству соответствующих уравнений в частных производных детальных физико-математических моделей. Такого рода упрощенные физически обоснованные модели в иерархии типов гидрологических моделей занимают промежуточное место между пространственно-распределенными физико-математическими моделями и пространственно-распределенными емкостными концептуальными моделями, и в этом смысле упрощенные физически обоснованные гидрологические модели могут рассматриваться как пример введения представлений и элементов пространственно-распределенных физико-математических моделей в распределенные концептуальные гидрологические модели. Такие модели сохраняют основные черты и преимущества пространственно-распределенных физико-математических моделей и в то же время более эффективны при решении прикладных

задач, т.к. они менее требовательны к составу и полноте исходной информации, а также малочувствительны к ошибкам в задании этой информации. Ниже дано описание в модели основных гидрологических процессов. Все вертикальные потоки (интенсивности осадков, выпитывания в почву, поверхностного водообразования, испарения, снеготаяния и т.д., а также коэффициент фильтрации) имеют размерность длины (слоя воды) в единицу времени, влажность и льдистость почвы и почвенно-гидрологические константы (наименьшая влагоемкость, влажность завядания и др.) даются в безразмерных единицах (объем воды в единице объема почвы), расходы воды — в единицах объема в единицу времени, размерность остальных переменных в общепринятых единицах.

В качестве основных видов информации для формирования баз данных ИМК ECOMAG используются следующие картографические материалы: цифровые топографические карты различных масштабов на территорию страны; цифровые модели рельефа (ЦМР) с разрешением 1 км; серии цифровых тематических карт (водных ресурсов, почвенная, ландшафтная и т.д.), отражающих характеристики и состояние природных ресурсов; карты-схемы пунктов наблюдений за состоянием окружающей среды.

Модельная схематизация водосборной площади и речной сети в бассейне р. Селенга выполнена с помощью ГИС-комплекса ECOMAG extension для ArcView 3.2 на основе тематических карт почв и растительности, полученных из глобальных баз данных Harmonized World Soil Data base (FAO/IIASA/ISRIC/ISSCAS/JRC, 2012) и Global Land Cover Characteristics Data Base Version 2.0 (Loveland et al., 2000), а также цифровой модели рельефа с разрешением 1 км (Lehner, Verdin and Jarvis, 2008). Для этого в базе данных ГИС заводился ряд слоев электронных тематических карт бассейна, таких как карты рельефа, гидрографической сети, почв, ландшафтов (Рисунок 4.2).



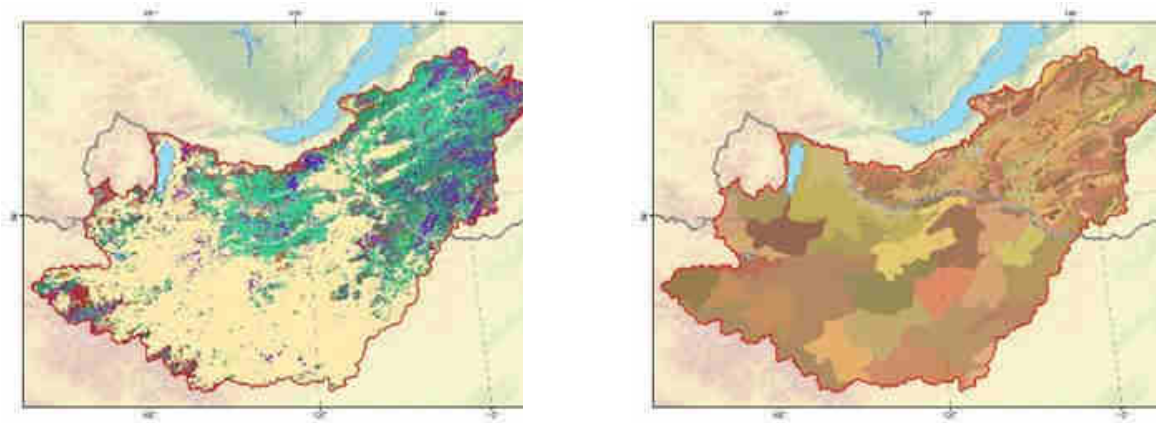


Рисунок 4.2. Тематические карты бассейна р. Селенга, использованные для схематизации бассейна и задания параметров модели

Затем производилась растеризация этих слоев по квадратной сетке с разрешением 1x1 км и каждой ячейке сетки присваивались соответствующие значения ее высоты (по рельефу), номера типов почв и ландшафтов. После этого с помощью специализированного ГИС-комплекса строилась модельная древообразная структура речной сети, выделялись линии водоразделов — границы частных водосборов притоков. Информация о характеристиках склоновых элементов и структуре речной сети (Рисунок 4.3) передавалась в ИМК ЕСОМАГ, где из соответствующих баз данных каждому элементу назначались соответствующие модельные параметры (почв, растительности и т.д.).

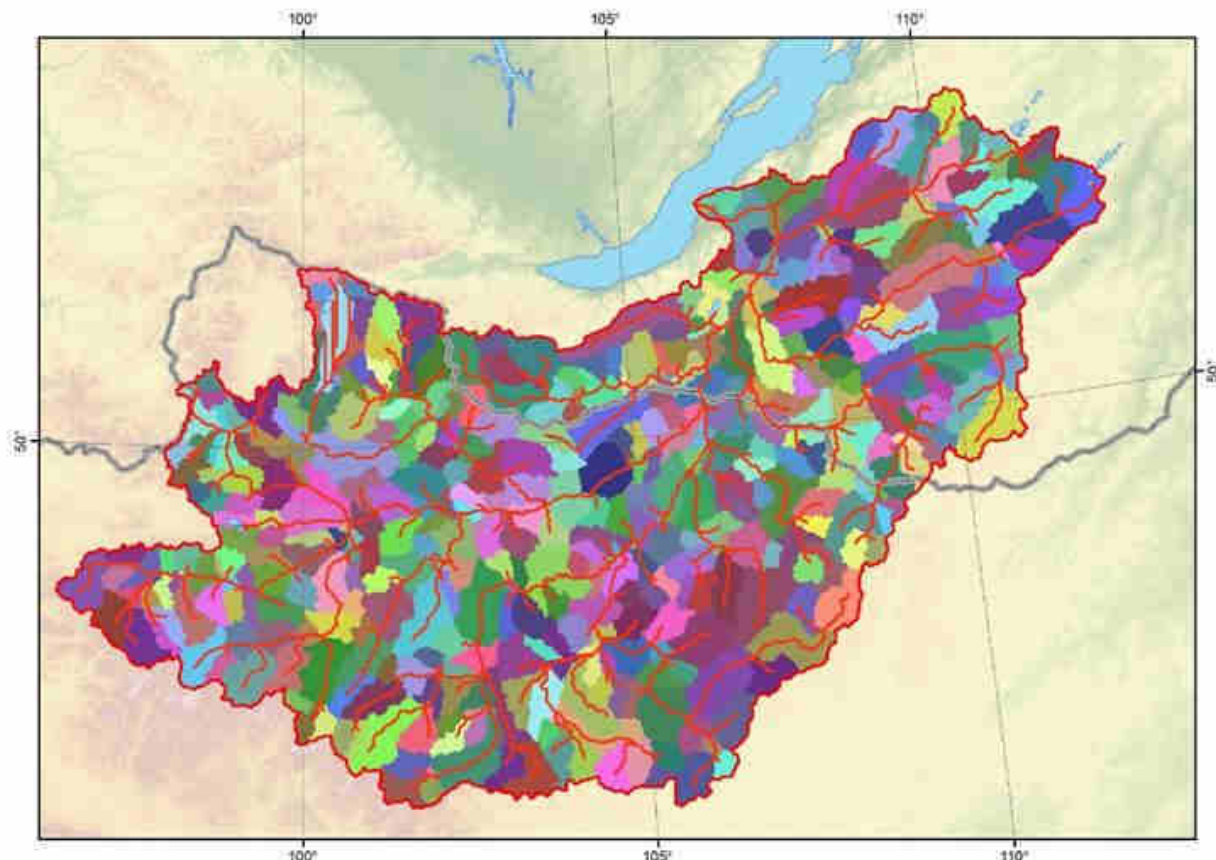


Рисунок 4.3. Модельная схематизация речной сети (разными цветами показаны расчетные элементарные водосборы)

Модель была калибрована и проверена по данным о фактических расходах воды на гидрометрических постах за период с 2007 по 2011 год. В качестве входов в модель использовались ряды фактических среднесуточных значений температуры и влажности воздуха, суточных сумм осадков за этот период, измеренные на 78 метеорологических станциях, расположенных на территории водосбора или в непосредственной близости от него (не дальше 100 км). Следует отметить, что российская часть бассейна Селенги значительно лучше освещена данными наблюдений как на метеорологических станциях, так и на гидрометрических постах, что накладывает определенные ограничения на качество моделирования.

Калибровка модели производилась по фактическим данным о расходах воды за период с 2007 по 2009 год; проверка модели на независимых данных производилась для периода 2010–2011 годы. Рассчитанные ежедневные расходы воды за весь период сравниваются с фактическими величинами на рисунке 4.

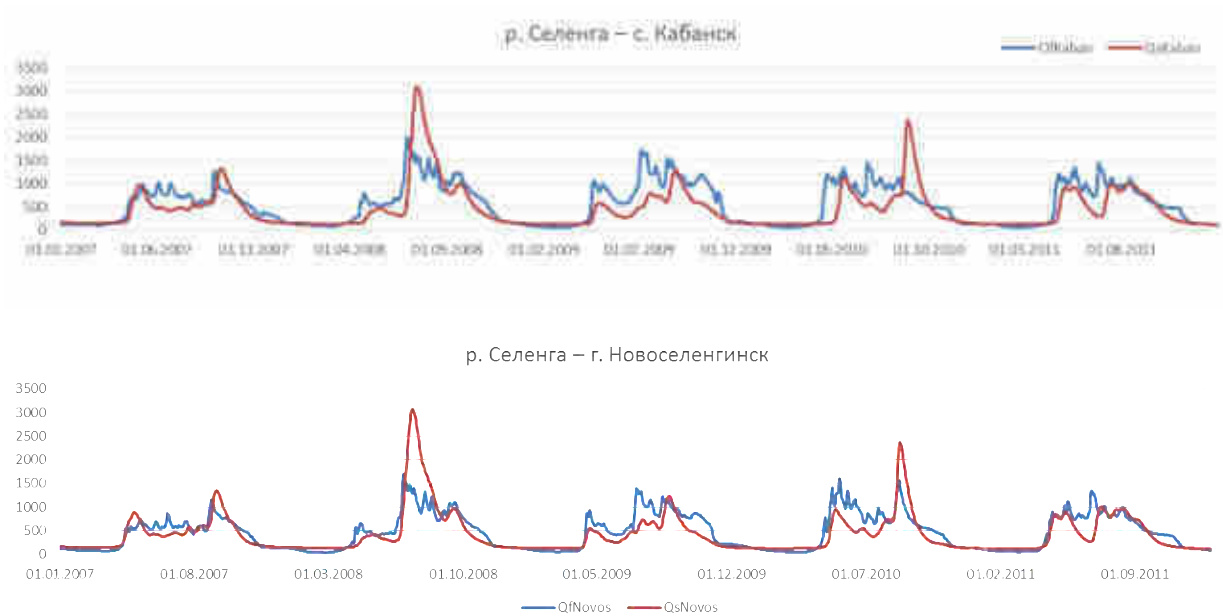


Рисунок 4.4. Гидрографы р. Селенга, рассчитанные для двух гидрометрических створов за 2007–2011 годы (синяя линия — измеренные расходы, красная — рассчитанные).

Доля среднеквадратической ошибки расчета среднемесячного объема стока составила для гидрометрического поста Кабанск 74% от естественной изменчивости этой величины за указанные годы, что говорит об удовлетворительном качестве расчета. С целью улучшения качества следует увеличить количество метеорологических станций в бассейне р. Селенга, данные которых используются для моделирования.

4.2. Обоснование критических уровней изменения гидрологического рек бассейна реки Селенга для моделирования реакции русловой сети на антропогенные нарушения

Для учета влияния проектируемого водохранилища на р. Орхон (рисунок 4.5) будет использован программный комплекс HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center — River Analysis System), который реализует одномерный подход к гидравлическому моделированию речных потоков.

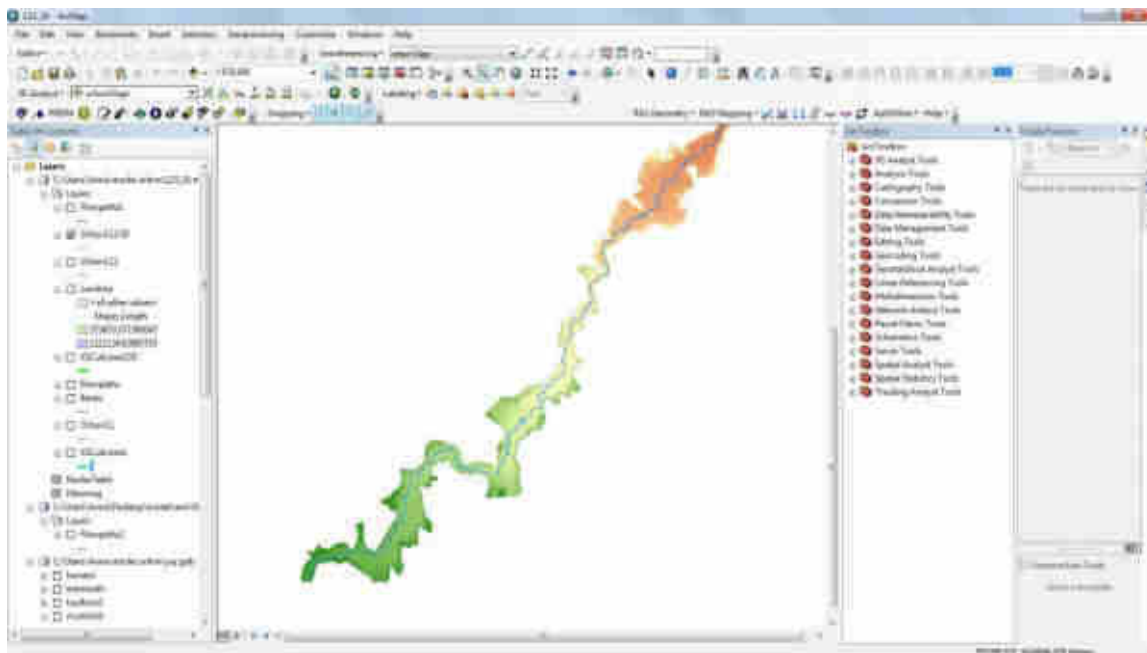


Рисунок 4.5. Модель нижнего течения р. Орхон в модели водного стока и перемещения загрязнителей HEC-RAS

В качестве входных гидрологических данных задаются граничные условия для квази-неустановившегося движения воды. Входные данные для верхнего створа будут представлены расходами воды, которые включают в себя зарегулированную — р. Орхон и не зарегулированную часть — р. Туул. После создания водохранилища существенную роль в стоке наносов р. Орхон будет играть сток наносов р. Туул, который значительно зависит от водности года и изменений антропогенной нагрузки в бассейне.

Для учета влияния водного стока, сценарные расчеты проводятся для условий маловодных, средних и многоводных лет. По имеющимся данным с гидрологического поста Туул — Улан-Батор была построена кривая обеспеченности средних годовых расходов воды. По многолетним данным подобраны года со значениями среднего годового расхода воды близки к расходам заданных обеспеченностей (0,1%, 5%, 50%, 90%), выбранные года были приведены к заданным обеспеченностям путем умножения расходов воды на переводной коэффициент ($K=Q(p)/Q$). (Рисунок 4.6).

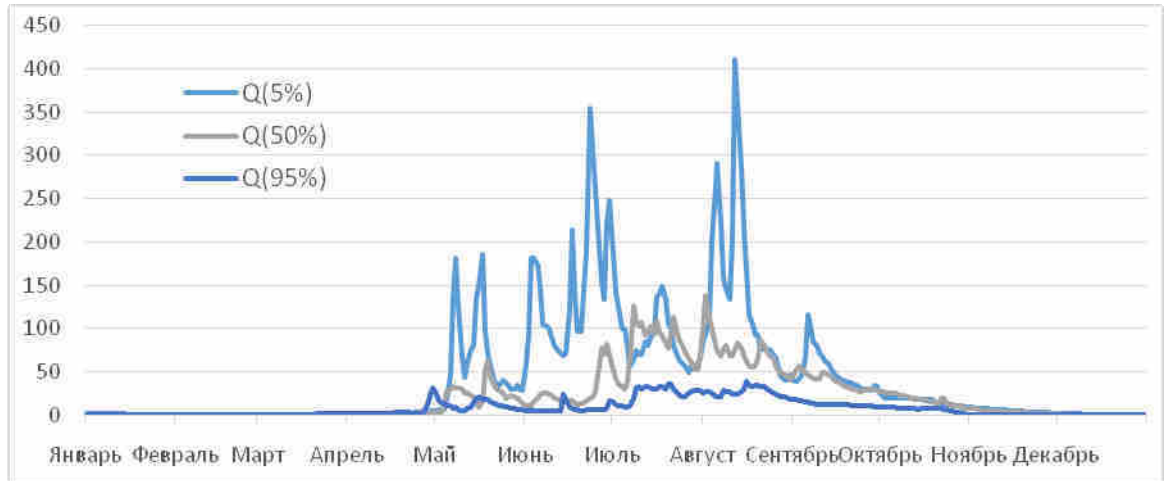


Рисунок 4.6. Гидрографы р. Туул

Для получения зарегулированной составляющей использованы данные с гидрологического поста Орхон-Орхон, путем трансформации гидрографов, имитируя сток в нижнем бьефе проектируемого водохранилища. В качестве входных гидрологических данных задаются граничные условия для квази-неустановившегося движения воды. Входные данные для верхнего створа будут представлены расходами воды, которые включают в себя зарегулированную — р. Орхон и не зарегулированную часть — р. Туул (рисунок 4.7). После создания водохранилища существенную роль в стоке наносов р. Орхон будет играть сток наносов р. Туул, который значительно зависит от водности реки и изменений в антропогенной нагрузке в бассейне.



Рисунок 4.7. Концепция моделирования трансформации водного режима и перемещения загрязнителей р. Орхон с помощью программного комплекса HEC_RAS

Сток в нижнем бьефе гидроузла зависит от правил эксплуатации гидроузла, пропускной способности и характерных уровней, и объемов водохранилища ($V_{пол}$, $V_{м.о.}$,

Вп). Для учета трансформации речного стока в период эксплуатации водохранилища, принято, что полезный объем или регулирующая емкость составляет 1/3 от общего объема водохранилища (0,25 км³). Исходя из предположения, что основная цель гидротехнического строительства — выработка электроэнергии, примем, что сброс воды в нижний бьеф будет происходить следующим образом. Опорожнение водохранилища будет приходиться на период до начала интенсивного притока в теплый период. Наименьший сброс в нижний бьеф не будет ниже заданного гарантированного расхода воды $Q_{гар}$. Сценарные расчеты проводятся при различных значениях $Q_{гар}$ (Q 75–95 % обеспеченности). Основную стокообразующую роль в бассейне р. Орхон играют дождевые осадки. В летнее время над территорией бассейна развивается активная циклоническая деятельность, которая вызывает резкое увеличение количества осадков. В период летне-осенних паводков водохранилище будет наполняться до нормального подпорного уровня (НПУ) для равномерного сброса в маловодный холодный период.

Для заданного гидрографа до начала половодья и в первое время его подъема поступающий в нижний бьеф расход воды $Q_H(t)$ равен гарантированному расходу $Q_{гар}$. Повышение уровня воды в водохранилище начинается с момента t_0 , когда расход воды притока превосходит гарантированный: $Q_D(t_0) > Q_{гар}$, накопленные за период половодья запасы воды используются для гарантированного сброса воды в период летней межени до начала паводков. Перед началом летне-осеннего периода паводков, поступающий в нижний бьеф расход воды $Q_H(t)$ равен гарантированному расходу $Q_{гар}$. Подача в нижний бьеф $Q_H(t) = Q_{гар}$ продолжается до момента t_1 , когда уровень воды в водохранилище достигает отметки нормального подпорного уровня: $Z(t_1) = Z_{НПУ}$. В течение отрезка времени от t_0 до t_1 заполняется полезный объем водохранилища (до НПУ).

После достижения отметки $Z_{НПУ}$ постепенно, по мере нарастания притока поступающий в нижний бьеф расход воды $Q_H(t)$ достигает значения максимального сбросного расхода $Q_{сбр}(t)$. Ежедневный сброс должен соответствовать доли к фактического расхода воды притока: $Q_{сбр} = Q_{при} \cdot K(Q_{при}) < Q_{сбр\ макс}$, а максимальный уровень водохранилища не должен превышать отметок ФПУ.

Накопленный запас воды будет использован для покрытия дефицита в период осенне-зимней межени, на протяжении которого в нижний бьеф поступает расход воды равный гарантированному (рисунок 4.8).

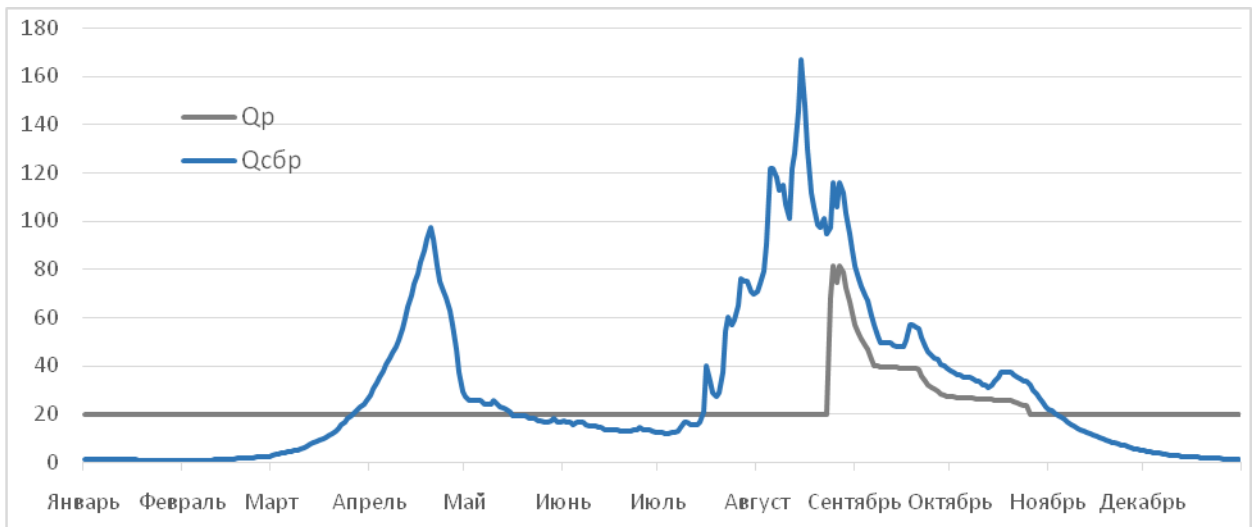


Рисунок 4.8. Естественный (г/п Орхон) и трансформированный сток р. Орхон для среднего по водности года

Для замыкающего створа, как граничные условия используются: кривые расходов воды (зависимость расхода воды от уровня), серии отметок водной поверхности и нормальная глубина. Так как отметки водной поверхности на границах неизвестны для нижних створов был выбран тип граничных условий — нормальная глубина. При использовании этой опции вводится уклон трения. Отметки глубин для каждой серии расходов считаются методом приближения, с помощью уравнения Шези в форме Маннинга.

Информация о наносах включает в себя: гранулометрический состав и граничные условия. Граничные условия задаются для одного или нескольких створов, выбирается один из трёх видов граничных условий: равновесное состояние, кривая расходов наносов, серии расходов наносов. Первый вид граничных условий подходит лишь для верхнего створа, проводится подсчёт транспортирующей способности потока, которая принимается равной притоку наносов, таким образом, на данном поперечном профиле не будет происходить размыв или отложение наносов. Кривая расходов представляет собой зависимость расхода наносов от расхода воды, данный тип граничных условий также применим только для верхнего створа. Вводятся значения расходов воды и наносов, а также сведения об их гранулометрическом составе. Если расход наносов не привязан к верхнему створу, используются серии расходов наносов, в отличие от кривой расходов данный вид условий не зависит от вводимых граничных условий для квази-

неустановившегося движения воды, на котором основывается подсчет транспорта наносов.

Для модельного участка р. Орхон граничные условия задаем в виде зависимости $R=f(Q)$. Зависимость принимает определенный вид для различных сценарных расчетов. Кроме того, как боковые граничные условия, в модель вводятся притоки р. Орхон (р. Хара и р. Еро).

Оценка стока наносов р. Орхон включает в себя различные варианты сценарных расчетов, включающие условия резких увеличений мутности (единичные сбросы), в таком случае условия на верхней границе задаются как серии расходов наносов с резкими увеличениями в течении нескольких дней, кроме того рассматривается одновременное влияние всех притоков Орхона на сток наносов реки и непосредственная оценка влияния проектируемого водохранилища. Прорабатываются следующие варианты расчетов:

1. Многоводный год с одновременным прохождением паводков на р. Орхон и притоках (Туул, Хара, Еро).

В качестве входных гидрологических данных трансформирован гидрограф р. Орхон — г/п Орхон за 1995 год (соответствующий году 5 % обеспеченности), гидрограф р. Туул — г/п Улан-Батор (1995 г.) также 5 % обеспеченности. В качестве боковых граничных условий гидрограф р. Хара — г/п Бурунхара (1994 г.) и Эроо (г.п. Эроо). Данный сценарий в первую очередь направлен на учет влияния повышенной водности притоков на суммарный сток наносов р. Орхон (рисунок 4.9).

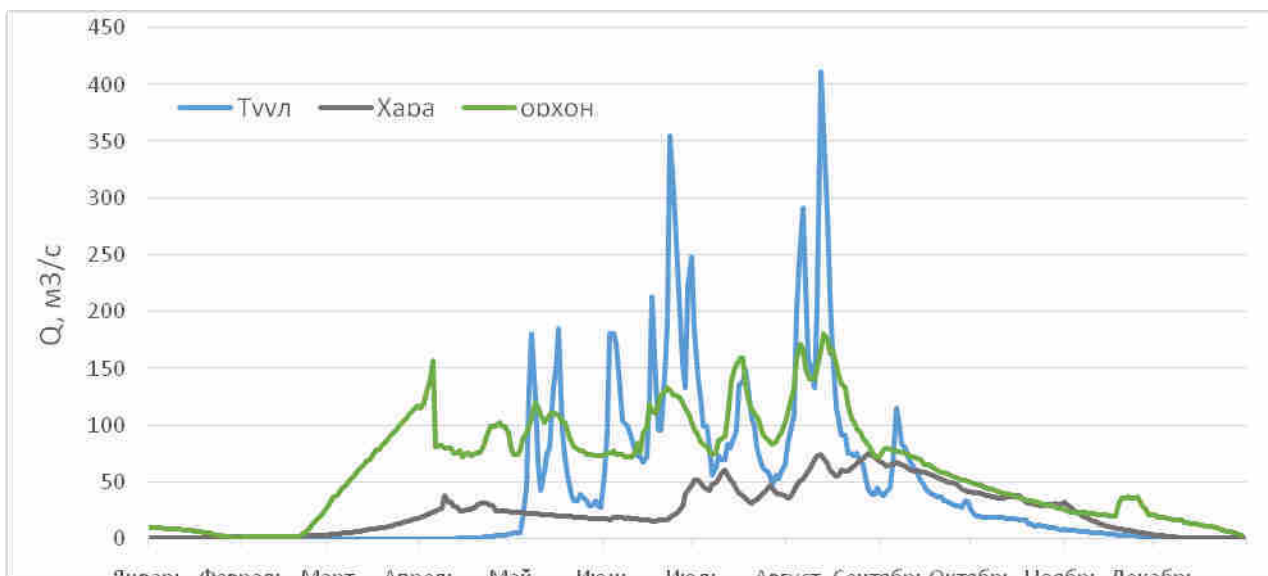


Рисунок 4.9. Сценарные гидрографы многоводного года с одновременным прохождением паводков

2. Средний по водности год, без учета и с учетом проектируемого водохранилища.

Для непосредственной оценки влияния гидроузла на сток наносов р. Орхон расчеты включают два этапа с различными входными условиями. В первом случае прорабатывается естественный сценарий, в качестве входных гидрологических данных используется гидрограф р. Орхон — г/п Орхон для среднего по водности года. Во втором случае используемый в расчетах гидрограф трансформируется по описанной выше методике. В обоих случаях сток р. Орхон суммируется со стоком р. Туул (маловодный год). Сценарий позволяет учесть как общее изменение стока наносов р. Орхон, так и его внутригодовую структуру.

3. Резкое увеличение мутности на р. Туул при нормальной работе гидроузла

Рассматриваемый сценарий имитирует резкое (антропогенное) увеличение стока наносов р. Туул за небольшой интервал времени. При условиях зарегулированности р. Орхон, сток наносов её основных притоков будет оказывать большее влияние, по сравнению с условиями естественного стока. Расчеты проводятся в недельном масштабе времени. Входные гидрологические данные состоят из суммы гарантированного расхода воды $Q_{гар}$, сбрасываемого в нижнем бьефе водохранилища и повышенного стока на р. Туул в период прохождения которого происходит многократное увеличение значений мутности воды. Расчеты выполняются при различных заданных значениях $Q_{гар}$.

Заключение

В результате выполнения работы получены следующие выводы:

1. Преимущественно климатические факторы определяют значительную трансформацию водного баланса бассейна р. Селенги и озера Байкал в последние десятилетия. После 1996 г. объем годового стока Селенги сократился на примерно на 14%. При этом, в российской части бассейна сокращение составило около 7%, а в монгольской части — 38%. Анализируются последствия уменьшения водного стока, характерного для региона, и возможные последствия этого процесса для режима озера. Показано, что в условиях сокращения поверхностного притока в озеро со стороны всех рек (с 62,9 до 54,3 км³) и сокращения расходной части (стока р. Ангара на 6 км³) при сохранении других элементов водного баланса будет происходить понижение уровня воды до тех пор, пока площадь акватории Байкала не сократится до 25 500 км². В этом случае произойдет уменьшение ежегодного объема испарения на 3 км³ за счет сокращения площади водной поверхности.

2. Прогнозные климатические оценки трансформации стока (по сценариям эмиссии парниковых газов на будущий период), показали увеличение температуры воздуха до 3°C в период с 2070 по 2099 годы. Такое увеличение среднегодовой температуры должно привести к деградации островной многолетней мерзлоты в пределах бассейна Селенги. Изменению в количестве осадков до 550 мм сопутствует рост испаряемости. Тем не менее, увеличение речного стока, которое также предсказывается в среднем по ансамблю, не может считаться устойчивой оценкой ввиду большого разброса значений по отдельным моделям внутри ансамбля, и климатический прогноз на основе глобальных моделей циркуляции атмосферы для бассейна Селенги в настоящее время нельзя признать адекватным.

3. Лучшую воспроизводимость демонстрирует применение региональных климатических и локальных воднобалансовых моделей. На основе воднобалансовых расчетов показано, что возможные последствия эксплуатации пректируемых водохранилищ в бассейне Селенги связаны с уменьшением внутригодовых колебаний стока Селенги в 1,12–1,15 раз, сокращением максимального среднемесячного стока на 5–6% и увеличением минимального зимнего на 57–63%. Суммарное воздействие

гидроузлов Чаргайт, Эгийн и Орхон (без ГЭС Шурэн) сократит размах колебаний среднемесячных величин стока Селенги у границы — с 1,95 до 0,96 км³/мес., увеличив зимний меженный сток в 2–3 раза и сократив максимальный летний в 1,5 раз. 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. Показано, что суммарного стока всех притоков Селенги на территории РФ с января по март недостаточно для двойного разбавления водной массы водохранилища, в результате чего введение в эксплуатацию водохранилищ приведет к трансформации состава речных вод за счет преобладания в стоке водной массы, поступающей из водохранилища.

Для точной оценки экологических последствий гидростроительства необходимы проектные сведения о морфометрии водохранилищ и их полезном объеме, о конструкции и параметрах водопропускных сооружений на каждом гидроузле, о максимальной пропускной способности водосливов, поскольку принятые допущения огрубил данную оценку. Без перечисленных сведений невозможно рассчитать пропуск половодья и паводков, более точную оценку внутригодовой трансформации стока во всей гидрографической сети Селенги. В дальнейшем для детализации прогноза внутригодового режима водохранилищ и характеристик сбрасываемой в нижний бьеф воды рекомендуется использовать гидрологическую модель водохранилища (разработка МГУ). Для этого требуются сведения о внутригодовом изменении притока в водохранилища и химического состава воды в годы разной водности, чтобы спрогнозировать изменение гидроэкологических характеристик воды, которая будет поступать в Байкал не в среднем за многолетие, а в периоды наиболее неблагоприятных условий водного и метеорологического режима в бассейне Селенги.

4. На региональном уровне возможные изменения хозяйственной деятельности приведут к изменению пространственного распределения осадков и температуры воздуха в летний период и, в меньшей степени, на среднегодовом масштабе осреднения для современного климата (2004–2012 гг.). Проведенные эксперименты с региональной климатической моделью COSMO-CLM показали, что в случае масштабной разработки месторождений полезных ископаемых на территории Монголии (преимущественно угле- и золоторазработки) в пределах всех существующих лицензионных территорий (нарушение до 35 % площади территории) разница в полях осадков на юге Монголии в случае повышения антропогенной нагрузки усиливается в более сухие годы, по сравнению с более влажными. Однако главным результатом можно признать то, что в

среднем для бассейна Селенги изменение ландшафтов на юге Монголии, смоделированное в проведенных экспериментах, не производит какого-либо влияния на климатологию осадков и приземной температуры воздуха. Некоторое влияние заметно лишь в отдельных модельных ячейках.

5. В рамках выполнения работы завершена подготовка модели формирования стока ЕСОМАГ на бассейн р. Селенги. Проведена настройка и калибровка модели. Перспективы ее дальнейшего использования связаны, в том числе, с прогнозом трансформации стока Селенги и отдельных ее притоков возможно в связи с региональными ожидаемыми изменениями полей осадков и температуры и увеличением мозаичности сухих и влажных районов, особенно в восточной части бассейна.

Программный комплекс ЕСОМАГ зарегистрирован, охраняется авторским правом и распространяется по лицензии. Держатель исключительных прав на программный комплекс - Институт водных проблем Российской академии наук.

Литература

- Атлас мирового водного баланса. М.-Л.: Гидрометеиздат, 1974.
- Афанасьев А.Н. Водные ресурсы и водный баланс бассейна озера Байкал, Новосибирск: Наука, 1976. 238 с.
- Водные ресурсы и водный баланс территории Советского Союза. Л.: ГМИ, 1967. 199 с.
- Гармаев Е.Ж., Христофоров А.В. Водные ресурсы рек бассейна озера Байкал: основы их использования и охраны — Новосибирск: Гео, 2010. — 301 с.
- Марченко О.Ю. Условия формирования и долговременные изменения экстремальной водности в бассейне реки Селенги. — Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата географических наук. Москва, 2013.
- Семенов В.А., Магмаржав Б. Гидрологический режим рек бассейна р. Селенги и методы его расчета. Л.: ГМИ, 1977. 233 с.; ресурсы поверхностных вод СССР. Л.: ГМИ, 1973. Т. 16. Вып. 3. 400 с.
- Структура и динамика речного стока горных регионов, Новосибирск: Наука, 1987. 160 с.
- Adam, J.C., Clark, E.A., Lettenmaier, D.P., Wood, E.F., 2006. Correction of global precipitation products for orographic effects. *J. Clim.* 19, 15–38.
- Adam, J.C., Lettenmaier, D.P., 2003. Adjustment of global gridded precipitation for systematic bias. *J. Geophys. Res.* 108, 1–14.
- Batima P., Natsagdorj L., Gombluudev P., Erdenetsetseg B. Observed climate change in Mongolia. AIACC Working Paper No.12. June 2005.
- Batima P., Natsagdorj L., Gombluudev P., Erdenetsetseg B. Observed climate change in Mongolia. AIACC Working Paper No.12. June 2005
- Gelfan A.N., Motovilov Yu.G. Long-term hydrological forecasting in cold regions: retrospect, current status and prospect. *Geography Compass* 3(5), 2009, 1841–1864.
- Grieser J., Gommel R., Bernardi M. New LocClim — the Local Climate Estimator of FAO. European Geosciences Union, Geophysical Research Abstracts, Vol. 8, 08305, 2006.
- Harris, I., Jones, P.D., Osborn, T.J., Lister, D.H., 2014. Updated high-resolution grids of monthly climatic observations — the CRU TS3.10 Dataset. *Int. J. Clim.* 34, 623–642.

FAO/IIASA/ISRIC/ISSCAS/JRC, 2012. Harmonized World Soil Database (version 1.2).
FAO, Rome, Italy and IIASA, Laxenburg, Austria.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2013. In: Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, Y., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley, P.M. (Eds.), *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.

Karthe D., M. Malsy, B.J. Kopp, S. Minderlein & L. Hülsmann. Assessing water availability and its drivers in the context of an integrated water resources management (IWRM): a case study from the Kharaa river basin, Mongolia. *Geoöko* volume/band XXXIV, 05–26 Göttingen, 2013.

Loveland, T.R., Reed, B.C., Brown, J.F., Ohlen, D.O., Zhu, J, Yang, L., and Merchant, J.W., 2000, Development of a Global Land Cover Characteristics Database and IGBP DISCover from 1-km AVHRR Data: *International Journal of Remote Sensing*, v. 21, no. 6/7, p. 1,303-1,330.

Lehner, B., Verdin, K., Jarvis, A. (2008): New global hydrography derived from space borne elevation data. *Eos, Transactions, AGU*, 89(10): 93-94. Sinyukovich V.N. The water balance of the Selenga river basin. *Geography and Natural Resources* 29 (2008). P. 54–56.

Motovilov Yu.G., L. Gottschalk, K. Engeland and A. Rodhe. Validation of a distributed hydrological model against spatial observation. *Agricultural and Forest Meteorology*. 1999b, 98-99, pp. 257-277.

Taylor, K.E., Stouffer, R.J., Meehl, G.A., 2012. An overview of CMIP5 and the experiment design. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 93, 485–498.

Törnqvist R., Jarsjö J., Pietroń J., Bring A., Rogberg P., Asokan S.M., Destouni G. Evolution of the hydro-climate system in the Lake Baikal basin. *Journal of Hydrology*, Volume 519, Part B, 27 November 2014, Pages 1953–1962.

Verzano, K. 2009: Climate change impacts on flood related hydrological processes: Further development and application of a global scale hydrological model. *Reports on Earth System Science* 71-2009. Hamburg: Max Planck Institute for Meteorology.

Weedon, G.P.; Gomes, S.; Viterbo, P. et al. 2011: Creation of the WATCH Forcing Data and Its Use to Assess Global and Regional Reference Crop Evaporation over Land during the Twentieth Century. *Journal of Hydrometeorology* 12(5): 823–848.