

На правах рукописи



ПУТИНЦЕВ Лев Александрович

**ФАКТОРЫ ФОРМИРОВАНИЯ, МОДЕЛИ И РАСЧЕТНЫЕ ОЦЕНКИ
БОКОВОГО ПРИТОКА В БОГУЧАНСКОЕ ВОДОХРАНИЛИЩЕ**

Специальность 1.6.16 – Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата географических наук

Красноярск – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Красноярский государственный аграрный университет» (ФГБОУ ВО Красноярский ГАУ)

Научный руководитель: **Бураков Дмитрий Анатольевич**
доктор географических наук
профессор кафедры Природообустройства
ФГБОУ ВО Красноярский ГАУ

Официальные оппоненты: **Христофоров Андрей Валентинович**
доктор географических наук
ФГБУ «Гидрометцентр России»

Морейдо Всеволод Михайлович
кандидат географических наук
Институт водных проблем РАН

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», географический факультет

Защита состоится «15» июня 2023 г. в 11 часов на заседании диссертационного совета 24.1.040.01 при ФГБУН Институте водных проблем Российской академии наук по адресу: 119333, Москва, ул. Губкина, д. 3. Тел.: 8(499)135-54-15.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института водных проблем РАН и на сайте: <http://www.iwp.ru>, с авторефератом – в сети Интернет на сайтах ВАК РФ (<http://vak.ed.gov.ru/>) и ИВП РАН (<http://www.iwp.ru>).

Отзывы на автореферат (в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим направлять по адресу: 119333, г. Москва, ул. Губкина, д. 3, Институт водных проблем РАН, ученому секретарю диссертационного совета 24.1.040.01, Соколовскому М.А., e-mail: sokolovskiy@iwp.ru).

Автореферат разослан «___» _____ 2023 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор физико-математических наук



М.А. Соколовский

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Анализ механизмов формирования речного стока в разных физико-географических условиях – классическая задача гидрологии суши. Для территорий, слабо освещенных данными натурных наблюдений, решение этой задачи признано мировым научным сообществом одной из ключевых и нерешенных проблем гидрологии. К территориям с недостатком данных мониторинга относятся речные бассейны Азиатской части России, для многих из которых знание факторов формирования речного стока и создание на этой основе физически обоснованных методов прогноза водного режима рек имеет большое значение вследствие нарастающих темпов вовлечения водных ресурсов в социально-экономическое развитие этих территорий. Богучанская ГЭС, введенная в эксплуатацию в 2014 г и предназначенная для покрытия дефицита растущего энергопотребления в связи с развитием в регионе Нижнего Приангарья энергоёмких производств – пример такого развития. Ввод Богучанской ГЭС на полную мощность состоялся в 2015 году.

При нормальной эксплуатации Богучанской ГЭС уровень водохранилища допускается изменять в диапазоне от 207.00 до 208.00 м. БС. При таком диапазоне нормативно допустимых изменений уровня для предотвращения ситуаций, связанных с переполнением Богучанского водохранилища, требуются надежные прогнозы бокового притока воды. Таким образом, исследование факторов формирования речного стока на водосборе Богучанского водохранилища и создание методик долгосрочного и краткосрочного прогноза бокового притока воды в это водохранилище – актуальная научная задача, имеющая важное практическое значение. Диссертационная работа направлена на решение этой задачи.

Степень разработанности темы исследования. Оснащенность бассейна водохранилища пунктами измерений стока воды слабая. Подробные гидрометрические наблюдения на малых реках в бассейне водохранилища производились с 1977 по 1987 год. В этот период Е.А. Шатуновой, А.И. Афанасьевым, В.А. Жоровым и др. были предложены варианты методик, предназначенных для расчета бокового притока в строящиеся Богучанское водохранилище. После 1987 года наблюдения за стоком малых рек в бассейне водохранилища не производились, по этой причине разработанные методики расчета и прогноза бокового притока требуют переработки с учетом изменившейся ситуации по информационному обеспечению такой задачи.

Цель исследования – анализ условий формирования речного стока на водосборе бокового притока Богучанского водохранилища и уточнение на этой основе методик расчета и прогноза бокового притока в водохранилище с учетом действующей в настоящее время сети пунктов гидрометеорологических наблюдений.

Для достижения этой цели решались следующие **задачи**:

- анализ условий формирования речного стока на водосборе бокового притока Богучанского водохранилища по данным гидрометеорологического мониторинга и спутникового зондирования земной поверхности;
- разработка методики расчета бокового притока в водохранилище Богучанской ГЭС в условиях недостаточности гидрометрических наблюдений;
- разработка физико-статистических методик долгосрочного прогноза объёма бокового притока в период половодья;
- разработка методики краткосрочного прогноза суточного бокового притока воды в исследуемое водохранилище за период открытого русла с применением концептуальной модели формирования стока.

Научная новизна и теоретическая значимость работы состоят в установлении взаимосвязей характеристик речного стока с обуславливающими его физико-географическими факторами и построении на этой основе физико-статистических и математических моделей прогноза бокового притока воды в водохранилище Богучанской ГЭС в условиях слабой гидрометеорологической изученности прилегающей территории.

Практическая значимость работы обусловлена ее направленностью на повышение качества гидрометеорологического обеспечения работы Богучанского гидроузла с учетом требований его технической и экологической безопасности.

Методы исследований. В работе реализованы методы водного баланса и гидрологической аналогии, методы математической статистики и математического моделирования. Комплексная обработка картографических материалов выполнялась с применением ГИС-технологий. Использовались математические методы и программные средства обработки и представления данных. В основу методики краткосрочного прогноза бокового притока положена используемая в сибирских УГМС концептуальная модель формирования стока Д.А. Буракова.

Исходные данные:

- результаты многолетних гидрометеорологических наблюдений сети станций и постов Красноярского и Иркутского УГМС;
- литературные источники, посвященные решению проблем расчета и прогноза бокового притока Богучанского водохранилища;
- материалы сибирского центра НИЦ «Планета» по мониторингу заснеженности (ГИС космического мониторинга В.Ю. Ромасько).

Защищаемые положения:

1. Установлено, что в бассейне Богучанского водохранилища влияние временного хода осадков за период снеготаяния, а также сопутствующего хода температуры воздуха, оказывается существенно меньшим, чем влияние условий, сложившихся к началу снеготаяния. Эти особенности стокообразования на исследуемой территории создают физическую основу для увеличения точности прогноза бокового притока воды в водохранилище за период половодья.

2. Показано, что основные факторы формирования потерь стока весенне-летнего половодья в бассейне нижней Ангары – влажность и глубина промерзания почвогрунтов перед началом снеготаяния в отсутствие данных прямых измерений могут быть заменены косвенными показателями, такими как сток и температура почвы за предшествующий осенний период, сумма положительных температур в марте.

3. Разработаны физико–статистические методики предсказания бокового притока во втором квартале, основанные на анализе гидрометеорологической информации. Прогнозные методики демонстрируют хорошее качество прогнозов, оцениваемых согласно стандартным критериям Росгидромета.

Достоверность и обоснованность полученных в работе выводов определяется использованием данных регулярных наблюдений Росгидромета (температура воздуха, атмосферные осадки, уровни и расходы воды), а также применением современных методов статистического анализа и концептуальной модели формирования речного стока, стандартных методов поверки гидрологических прогнозов, принятых в Росгидромете.

Личный вклад автора. Систематизация первичных гидрометеорологических данных за 1978–2021 годы, разработка методик краткосрочного и долгосрочного

прогноза бокового притока воды в водохранилище Богучанской ГЭС, формулировка выводов. При опубликовании работ в соавторстве автор участвовал в постановке задач, обработке, анализе и интерпретации результатов расчётов.

Публикации по теме диссертации. По результатам исследований опубликовано 8 научных работ, из них 3 статьи в журналах и изданиях, определенных Высшей аттестационной комиссией и 5 работ в сборниках материалов конференций.

Апробация работы. Результаты исследования обсуждались на конференциях различного уровня: Научно-практическая школа-семинар молодых ученых и специалистов в области гидрометеорологии (Новосибирск, 2012); VII Всероссийский гидрологический съезд (Санкт-Петербург, 2013); VIII Всероссийская конференция с международным участием, посвященная Всемирному дню Земли и Российскому Году охраны окружающей среды "География и геоэкология на службе науки и инновационного образования" (Красноярск, 2013); XII конференция, посвященная Международному дню воды (Красноярск, 2017), ряд семинаров в ФГБУ «Среднесибирское УГМС» (Красноярск);

Объем и структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения и приложений. Текст диссертации представляет с собой рукопись, изложенную на 101 странице машинописного текста, включает 24 рисунка, 31 таблицу. Список литературных источников включает в себя 99 наименований. Приведенные в тексте диссертации таблицы, графики, рисунки, если это не оговорено, разработаны автором диссертации.

Благодарности. Автор выражает благодарность научному руководителю зав. кафедры природообустройства Красноярского государственного аграрного университета, профессору, д.г.н. Д.А. Буракову за предоставленную интересную тему, за научное руководство и помощь на всех этапах выполнения исследования. Также автор искренне благодарит начальника Гидрометцентра ФГБУ «Среднесибирское УГМС» И.Н. Гордеева за ценные замечания и предложения в ходе проведения исследования, участие в обсуждении полученных результатов, рецензентов работы. Особую благодарность автор выражает д.г.н. А.В. Игнатову, за поддержку и помощь на заключительных этапах работы.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность выбранной темы диссертации, определены цели и задачи работы, методы их решения, показана научная новизна и практическая значимость полученных результатов. Сформулированы и перечислены положения, выносимые на защиту.

В первой главе работы описаны физико-географические условия, климатические характеристики и особенности территории бассейна Богучанского водохранилища и его окрестностей. Рассмотрены условия формирования стока в бассейне водохранилища, гидрологическая изученность, определены бассейны-аналоги.

Оснащенность бассейна водохранилища пунктами измерений стока воды слабая как по территории, так и по продолжительности наблюдений (рисунок 1).

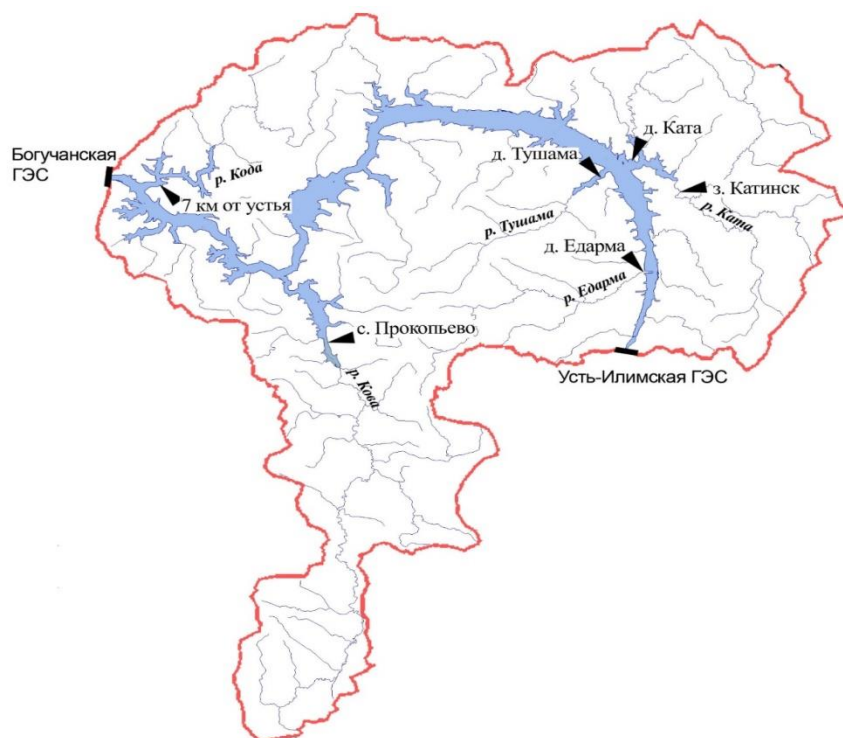


Рисунок 1 – Схема гидрологической сети малых рек
(Обозначения: ▲ – гидрологические наблюдения; — – граница бассейна Богучанского водохранилища)

Подробные гидрометрические наблюдения на малых реках в бассейне водохранилища производились с 1977 по 1987 г. В этот период было разработано несколько методик расчета бокового притока, которые из-за отсутствия наблюдений, требуют коренной переработки. После 1987 года ежедневные гидрологические наблюдения в бассейне водохранилища были прекращены. В настоящее время в

бассейне водохранилища наблюдения производятся только за уровнем водохранилища. Проблема расчета бокового притока в условиях прекращения наблюдений решалась с применением рек-аналогов, расположенных за пределами бассейна водохранилища.

Оснащенность бассейна водохранилища пунктами измерений стока воды слабая как по территории, так и по продолжительности наблюдений (рисунок 1). Подробные гидрометрические наблюдения на малых реках в бассейне водохранилища производились с 1977 по 1987 г. В этот период было разработано несколько методик расчета бокового притока, которые из-за отсутствия наблюдений, требуют коренной переработки. После 1987 года ежедневные гидрологические наблюдения в бассейне водохранилища были прекращены. В настоящее время в бассейне водохранилища наблюдения производятся только за уровнем водохранилища. Проблема расчета бокового притока в условиях прекращения наблюдений решалась с применением рек-аналогов, расположенных за пределами бассейна водохранилища.

На основе данных снегомерных съемок Гидрометеорологической службы построена карта изолиний, приближенно отражающая изменение запаса воды в снеге на территории бассейна Среднего Енисея и Ангары (рисунок 2).

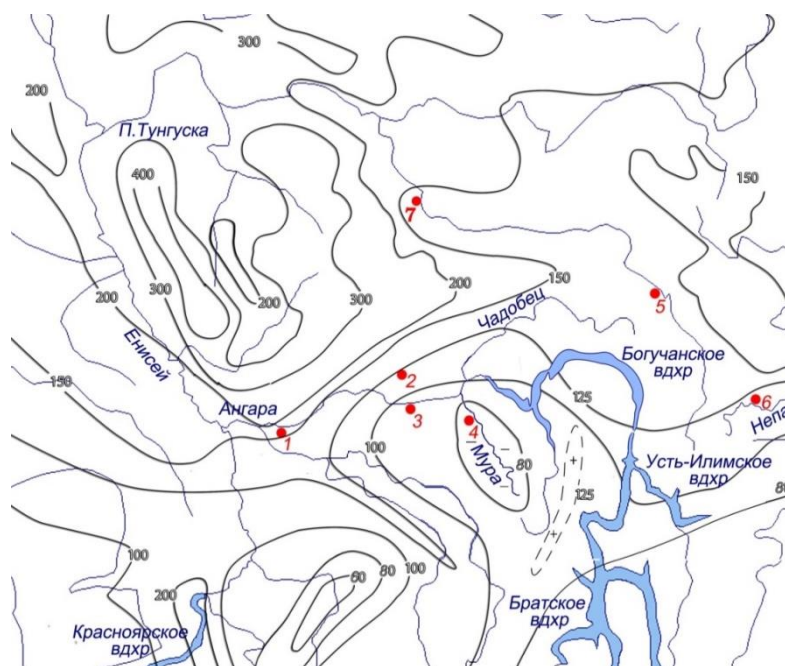


Рисунок 2 – Средние многолетние запасы воды в снеге (мм) перед началом снеготаяния

Примечание – метеорологические станции, отмеченные на рисунке: 1- Мотыгино, 2-Бедоба, 3-Богучаны, 4-Ирба, 5-Чемдальск, 6-Токма, 7-Усть-Камо.

Также оценка снегонакопления производилась по результатам космического мониторинга заснеженности В.Ю. Ромасько. Изображения площади снегового покрытия в период снеготаяния за период 2005 - 2021 годы, отобранные для случаев с облачностью, не превышающей 30 % и послужили основой для оценки динамики площади снегового покрытия по высотным зонам бассейна водохранилища.

Притоки Ангары на участке между Богучанской и Усть-Илимской ГЭС имеют режим с резко выраженным весенним половодьем и характеризуются преимущественно снеговым типом питания. В распределении типов питания наибольшая доля приходится на снеговую составляющую – 70-75 %, грунтовое питание 10-15 %, а на дождевое питание остается всего 5-10 % от общего стока. Средние даты начала половодья на притоках приходятся на первую декаду мая.

Стокообразование в бассейне водохранилища имеет ряд особенностей. В первую очередь, установлено слабое влияние на форму гидрографа осадков в весенне-летний период. Дождевые паводки на малых реках нижней части бассейна Ангары невысокие. Выпадающие в летний период жидкие осадки расходуются, в основном, на испарение и пополнение запасов грунтовых вод. Сток талых вод формирует основную часть годового стока. Половодье обычно проходит плавной одномодальной волной, однако в отдельные годы на спаде наблюдаются небольшие подъемы за счет выпадения дождей.

Эти и другие особенности стокообразования на исследуемой территории создают физическую основу для увеличения точности прогноза бокового притока воды в водохранилище за период половодья.

В настоящее время, наблюдение за стоком малых рек в бассейне водохранилища отсутствуют, но сопредельная с водохранилищем территория достаточно однородна, что послужило основанием для выбора рек-аналогов. На рисунке 3 показаны бассейны рек (Чадобец, Мура, Непа), располагающиеся вне площади Богучанского водохранилища, на которых в настоящее время производятся гидрометрические наблюдения. Данные наблюдений по этим бассейнам послужили основой для расчета и прогноза бокового притока. По результатам исследования дана оценка основных характеристики водного баланса рек-аналогов за период весеннего половодья. Установлено наличие связи дат начала половодья и перехода средней суточной температуры воздуха через 0°C. Данные наблюдений по этим

бассейнам послужили основой для расчета бокового притока в водохранилище Богучанской ГЭС.



Рисунок 3 – Схема расположения рек – аналогов
Примечание – бассейны рек: 1 – Мура; 2 – Чадобец; 3 – Непа.
Штриховкой выделен бассейн Богучанского водохранилища

Вторая глава посвящена расчету суточного притока воды в водохранилище Богучанской ГЭС в условиях слабой оснащённости пунктами измерений стока воды как по территории водохранилища, так и по продолжительности наблюдений.

Расчет бокового притока выполнялся балансовым и гидрометрическим методом.

Расчет бокового притока балансовым методом основан на обстоятельных исследованиях методологии и точности расчета бокового притока в водохранилища Р.А. Нежиховским. Расчет по методу водного баланса выполнялся только применительно к декадным, месячным и квартальным временным интервалам, т.к. точность водно-балансового метода быстро падает с уменьшением расчетного отрезка времени, за который вычислялся приток, из-за неточного учета аккумуляции воды в водохранилище по данным малого числа водомерных пунктов, и денивеляций водной поверхности (перекос поверхности уровня водоёмов, возникающий в результате сгонно-нагонных явлений или сейшевых колебаний). С увеличением доли аккумуляции в водном балансе водохранилища возрастают ошибки расчета ежедневного притока.

На практике для расчета суточных величин бокового притока используется гидрометрический метод, который применяется для расчетов неизученного притока за короткие промежутки времени. Расчет гидрометрическим методом был произведен в условиях современной гидрологической изученности исследуемой территории.

Расчет производился в два этапа. На **первом** этапе боковой приток рассчитан за период с 1977 по 1987 г., когда проводились гидрологические наблюдения на малых реках, бассейны которых располагаются на водосборной площади водохранилища. Площадь бассейна водохранилища была разделена на три района, приток с которых «контролируется» стоком соответствующих малых рек, коэффициенты стоковой приводки для выделенных районов, определялись как отношение площади районов к соответствующим площадям бассейнов-аналогов.

На **втором** этапе произведен расчет бокового притока после 1987 года, когда наблюдения за стоком малых рек в бассейне водохранилища были прекращены. Расчет выполнялся по данным о стоке рек-аналогов Мура, Чадобец, Непа, расположенных за пределами водохранилища, но на которых не прерывались гидрометрические наблюдения. Высокие показатели корреляционной связи между стоком рассматриваемых аналогов послужили основанием для построения уравнения регрессии, по которому был произведен расчет суточного бокового притока с 1988 по 2021 г.

В дальнейшем, был произведен сравнительный анализ оценок бокового притока, полученного разными методами. В результате, приоритет был отдан гидрометрическому методу, и расчетные оценки, полученные с его использованием, далее называемые «фактическими» значениями бокового притока в Богучанское водохранилище, были использованы при построении его прогностических моделей.

Третья глава посвящена рассмотрению нескольких эмпирических моделей, предназначенных для прогноза квартального бокового притока воды в водохранилище Богучанской ГЭС в период половодья.

Первый способ прогноза производился применением линейной эмпирической зависимости. В разработанной автором базе данных Росгидромета, характеризующих условия формирования бокового притока в водохранилище Богучанской ГЭС, насчитывается более 100 переменных, которые могут выступать в качестве его предикторов. Из общих физико-географических соображений в эту базу

были включены данные о значениях следующих группы характеристик, отражающих основные факторы формирования притока.

В таблице 1 представлены предикторы, отобранные из исходного сформированного их множества с применением метода пошаговой регрессии.

Таблица 1 – Переменные, отобранные на основе регрессионного анализа

| Обозначение | Наименование |
|-------------------|--|
| $Q_{2кв}$ | Боковой приток воды в Богучанское водохранилище за второй (апрель, май, июнь) квартал (предиктант) |
| S_I | Максимальный запас воды в снежном покрове в бассейне бокового притока |
| X_{10} | Сумма месячных осадков за октябрь у с. Ванавара |
| t_{n10} | Температура почвы за октябрь у с. Богучаны |
| Σt_{1max} | Сумма максимальных за сутки положительных температур у с. Ванавара за март |
| Q_{10} | средний за октябрь расход воды на р. Непа у д. Ика |
| ΣX_1 | Сумма осадков с октября по март у с. Ванавара |
| ΣX_2 | Сумма осадков с октября по март у г. Тайшет |

Необходимо отметить, что в результате проведенного анализа было установлено, что влияние предикторов, характеризующих величину и ход осадков в период половодья, оказалось существенно меньшим, чем условия сложившиеся перед началом снеготаяния, поэтому сумма осадков в период половодья не была включена в окончательное уравнение.

При использовании эмпирического подхода и статистического анализа в условиях ограниченной исходной информации каждый предиктор важен, прежде всего, с точки зрения того, насколько он отражает ситуацию в бассейне в целом. Коэффициенты парной корреляции между отобранными предикторами по абсолютной величине, в основном, менее 0.40, т. е. явная коррелированность не выражена или выражена слабо.

Уравнение линейной регрессии для прогноза бокового притока воды в водохранилище Богучанской ГЭС за второй квартал ($Q_{2кв}$) получено в следующем виде:

$$Q_{2кв} = 1,17S_I + 2,62X_{10} - 48,5t_{n10} - 1,76\Sigma t_{1max} + 2,35Q_{10} + 0,829\Sigma X_1 + 0,889\Sigma X_2 + 197 \quad (1)$$

Целесообразность включения предикторов в прогностическую модель подтверждается не только физическими соображениями, но и значениями t-

статистик. Последние вычисляются как отношения коэффициентов регрессии к их средним квадратичным ошибкам. Чем больше t-статистики по абсолютному значению превышают единицу, тем надежнее определяются коэффициенты регрессии. Параметры уравнения регрессии и значения t-статистик приведены в таблице 2.

Высокий коэффициент множественной корреляции и значения t-статистик при аргументах, а также отсутствие противоречий в логике подбора предикторов позволяют сделать вывод о репрезентативности аргументов, входящих в прогностическое уравнение.

Таблица 2 – Коэффициенты уравнения регрессии и их t-статистики

| Обозначение предиктора в уравнении (3.1) | Значение коэффициента | t-статистика |
|--|-----------------------|--------------|
| Свободный член | 197 | 2,12 |
| S_1 | 1,17 | 2,20 |
| X_{10} | 2,62 | 2,66 |
| t_{10_n} | -48,5 | -4,88 |
| Σt_{1max} | -1,76 | -4,25 |
| Q_{10} | 2,35 | 2,09 |
| ΣX_1 | 0,829 | 2,66 |
| ΣX_2 | 0,889 | 2,39 |

При построении прогностических моделей бокового притока исходные данные были разбиты на обучающую и контрольную выборки. Обучающая выборка использована для построения математических отношений между предиктантом и предикторами. Контрольная выборка служила для получения оценки прогнозных свойств модели на независимых данных, т.е. данных, которые не были использованы для обучения модели. Для обучающей выборки обычно используют 75-80% от объема имеющихся исходных данных. Для построения моделей прогноза бокового притока обучающая выборка включала наблюдения за 1980–2012 гг., а контрольная - за 2013–2021 годы.

При расчете бокового притока воды по обучающей выборке по уравнению (1) ошибка не превышает допустимую в 31 случаях из 32, $S/\sigma = 0,370$. По результатам прогноза по контрольной выборке ошибка не превышает допустимую в 8 случаях из 9, (оправдываемость 89 %), S/σ на период испытаний – 0,356.

Второй способ прогноза бокового притока основан на информации о стоке рек-аналогов (Мура, Чадобец, Непа). По результатам исследования установлено, что боковой приток в Богучанское водохранилище и сток рек-аналогов достаточно сильно коррелированы, линейная модель для расчета бокового притока по результатам данных о стоке рек-аналогов представлена в виде:

$$Q_{2кв} = 0,316Y_{ч} + 0,546Y_{М} + 0,138Y_{Н} + 173, \quad (2)$$

где $Y_{ч}$, $Y_{М}$, $Y_{Н}$ – сток рек-аналогов за второй квартал (Чадобец, Мура, и Непа); $R = 0,978$, $S/\sigma = 0,220$.

Для расчета по уравнению 2, были разработаны линейные регрессионные уравнения для расчета стока рек-аналогов Мура, Чадобец и Непа за второй квартал. Критерий качества S/σ полученных зависимостей составляет 0,380, 0,411, 0,464 соответственно. Коэффициенты парной корреляции между предикторами по абсолютной величине в основном меньше 0,40. Что касается оценок $Q_{2кв}$, то они были получены независимо от оценок $Y_{ч}$, $Y_{М}$, $Y_{Н}$, на основе данных непосредственных измерений в бассейне бокового притока Богучанского водохранилища в 1977–1987 годы и данных, полученных водно-балансовым методом за период 1988–2012 гг.

При прогнозе бокового притока воды по обучающей выборке по уравнению (2) ошибка не превышает допустимую в 29 случаях из 32, $S/\sigma = 0,407$. По результатам прогноза по контрольной выборке ошибка не превышает допустимую в 8 случаях из 9, (оправдываемость 89 %), S/σ на период испытаний – 0.310.

Ключевым фактором, определяющим потери весеннего стока в рассматриваемых условиях, является осеннее увлажнение водосборов и другие факторы водопроницаемости почв. Одним из важных результатов исследования была оценка влияния на сток весеннего половодья характеристик осеннего увлажнения и промерзания почвы. По результатам регрессионного анализа были определены косвенные характеристики водопроницаемости почвы (m), в которую вошли данные об осеннем стоке рек-аналогов, температуре почвы за осенний период, среднемесячным осенним осадкам, суммам положительных температур в марте.

Учет характеристики (m) позволил существенно увеличить точность прогнозов, и она была использована в дальнейших расчетах.

Третий способ прогноза основан на использовании физико-статистических водно-балансовых уравнений, вытекающих из инфильтрационно-ёмкостной модели Е.Г. Попова. Ниже представлено её применение при степенной аппроксимации зависимости стока от поступления воды в редакции Д.А. Буракова:

$$Y = \alpha \left(H + U - P_{\max} \left[1 + \left(\frac{H+U}{P_{\max}} \right)^n \right]^{\frac{1}{n}} \right), \quad (3)$$

$$H = S + X - (J + Z), \quad (4)$$

$$J + Z = b(X + U) \left[1 - f \left(\frac{m - m_{\min}}{\bar{m} - m_{\min}} \right)^{St} \right], \quad (5)$$

$$U = c \times \lg[k(m - m_{\min})^{St} + 1], \quad (6)$$

где Y – боковой приток в водохранилище; $\alpha = k_c (1 - \omega)$ – сборный коэффициент учитывающий долю постоянно бессточной площади (ω) и относительные потери (k_c) стока половодья в период спада; H – слой заполнения водоудерживающей емкости; $(S+X)$ – поступление воды за период половодья; Z, J – испарение и инфильтрация за этот период; U – слой начального (на момент начала снеготаяния) заполнения водоудерживающей емкости; P_{\max} – параметр потерь, который характеризует водоудерживающую емкость бассейна при наиболее низком предшествующем увлажнении; n – параметр, используемый при описании характера распределения водоудерживающей емкости на площади водосбора; m – комплексный показатель водопроницаемости почв; m_{\min} и \bar{m} – соответственно его минимальная и средняя величина за период наблюдений; k – коэффициент значения которого подбирается при оптимизации; b – коэффициент, используемый при описании зависимости потерь на инфильтрацию и испарение от суммарного поступления воды и комплексного показателя m ; f – коэффициент, используемый при описании влияния комплексного показателя m на ёмкостное задержание; c – коэффициент, используемый при описании связи ёмкостного поглощения с комплексным показателем m ; St – показатель степени, учитывающий нелинейность влияния показателя m на инфильтрационные (J) и ёмкостные (U) потери.

Структура приведенных уравнений учитывает закономерности задержания или потерь воды, не попадающей в сток половодья. Модель, основанная на уравнениях (3-6), реализована в виде специализированной компьютерной программы. Последовательность оценки ее параметров с применением методов оптимизации рассмотрена в работах Д.А. Буракова. На рисунке 3.1 представлена

зависимость $Y=f(S+X, m)$, рассчитанная по уравнению 5. Необходимо отметить, что при $S+x = 0$ сток Y больше нуля, что можно связать с поступлением воды при оттаивании почвенной мерзлоты (U).

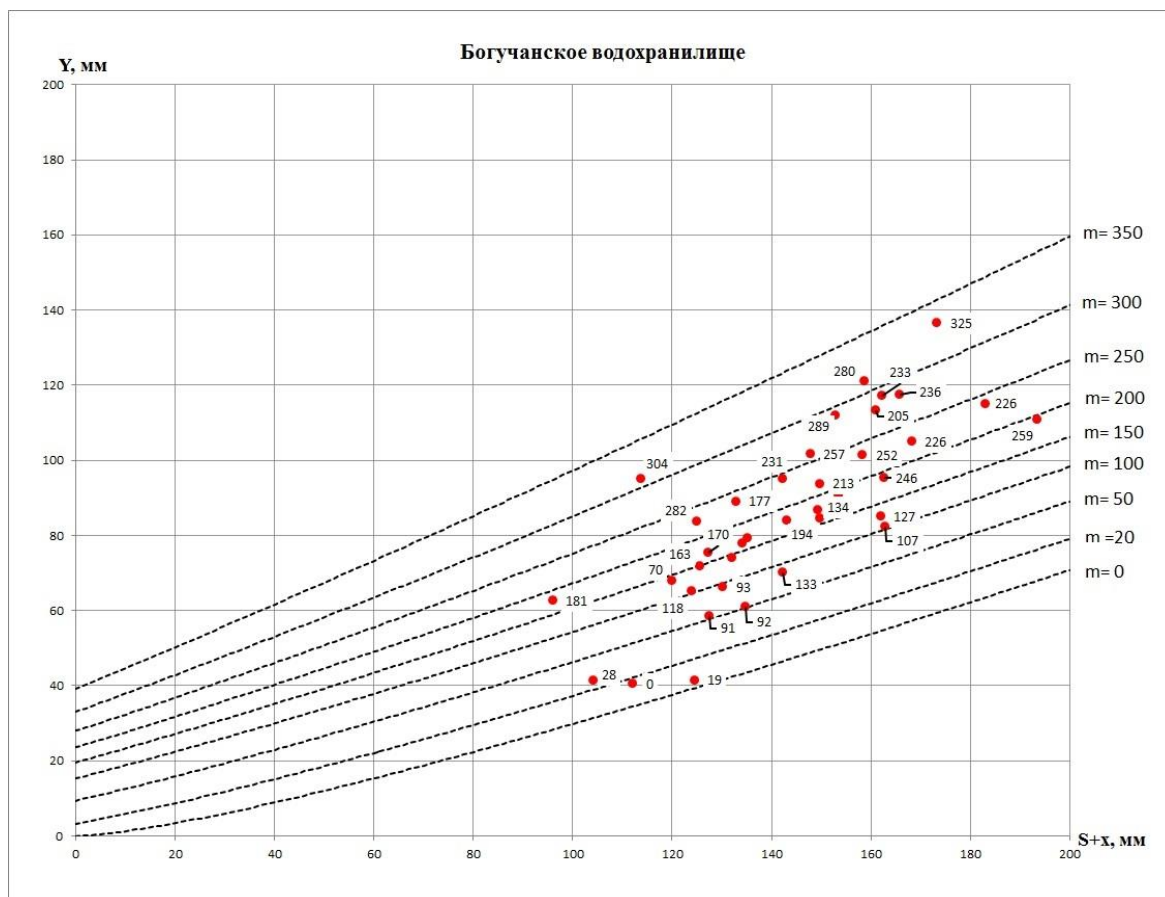


Рисунок 4 – Зависимость $Y = f(S + X, m)$

В таблице 3 представлены средние многолетние характеристики потерь талых вод, которые рассчитаны по уравнениям 3–6.

Таблица 3 – Средние многолетние характеристики потерь стока

| Характеристика потерь | Обозначение | Среднее многолетнее значение (числитель: мм; знаменатель: % суммарных потерь) |
|---|--|--|
| Инфильтрация и испарение за период снеготаяния | $J+Z=b(S+x+U) \left[1-f\left(\frac{m-m_{min}}{\bar{m}-m_{min}}\right)^{St} \right]$ | $\frac{10,5}{20}$ |
| Емкостное задержание на водосборе | $P_{emk}=P_{max} \left[1+\left(\frac{H}{P_{max}}\right)^{-n} \right]^{\frac{1}{n}}$ | $\frac{122}{80}$ |
| Суммарные потери на водосборе за период половодья | $P_A=P_{emk}+(J+Z),$ | $\frac{133}{100}$ |

Согласно полученным оценкам, бассейн Богучанского водохранилища характеризуются инфильтрационно-емкостным типом водопоглощения с преобладанием емкостных потерь. т. е. формирование склонового стока происходит после заполнения водоудерживающей емкости, когда поступление воды ($S + x$) превышает инфильтрацию и испарение ($J + Z$). Этот механизм особенно ярко проявляется в лесу. Территория Богучанского водохранилища покрыта лесом более чем на 90 %, поэтому описываемый механизм как раз характерен для этой территории.

При расчете бокового притока воды с применением инфильтрационно-емкостной модели по обучающей выборке за период 1980–2012 гг. ошибка не превышает допустимую в 30 случаях из 32, $S/\sigma = 0,388$. По результатам прогноза по контрольной выборке за период 2013–2021 гг. ошибка не превышает допустимую в 9 случаях из 9, S/σ на период испытаний – 0,347.

В целом, рассмотренные в этой главе методики характеризуются оправдываемостью прогноза более 90 %, S/σ – от 0,310 до 0,407. Расчет с применением уравнений (3.15–3.18) с точки зрения учета физики процесса формирования стока половодья является более предпочтительным, поскольку эти уравнения опираются на определенные известные закономерности формирования стока. Кроме того, оператор, аппроксимирующий зависимость стока от действующих факторов, позволяет в какой-то степени учесть ее фактически возможную нелинейность.

Четвертая глава посвящена реализации прогноза бокового притока воды в Богучанское водохранилище с применением концептуальной математической модели Д.А. Буракова.

Модель основывается на параметрическом представлении ключевых процессов формирования стока. Она используется для моделирования стока горно-равнинных рек Сибири и успешно внедрена в оперативную практику в отделах гидрологических прогнозов сибирских УГМС Росгидромета. Особенность модели заключается в том, что в условиях ограниченного информационного обеспечения для решения поставленной задачи используется как наземная, так и спутниковая информация. Последняя позволяет учесть динамику площади снегового покрытия бассейна в период снеготаяния. На этой основе уточняются параметры блоков снегонакопления и снеготаяния математической модели формирования весеннего

стока. Другой особенностью модели является подход к расчетам руслового добега воды, в основе которого положена вероятностная трактовка кривых добега. Наконец, модель учитывает русловые запасы воды на дату выпуска прогноза по измерениям уровней воды в речной системе.

Модель относится к типу комбинированных моделей, т.к. она учитывает закономерности процессов, которые происходят на склонах водосбора и в русле реки. Принципы построения и структура модели в однородном ландшафтно-гидрологическом районе представлена на рисунке 5.



Рисунок 5 – Принципы и структура построения модели прогноза

Для калибровки модели используются данные о снегонакоплении, температуре воздуха, ежедневных осадков, а также о запасах воды в речной системе на дату выпуска прогноза, что в совокупности с дополнительной информацией о закономерностях формирования стока, заложенной в структуру оператора модели, позволяет увеличить точность прогнозирования ежедневных уровней (расходов) воды. Данные кратко- и среднесрочных метеорологических прогнозов используются для задания температуры и осадков за период заблаговременности.

Для реализации модели отобраны наиболее репрезентативные метеорологические станции. Вычисление переменной в ходе снеготаяния площади снегового покрытия и водоудерживающей емкости снега производится по методике А.Г. Ковзеля, расчет водоотдачи бассейна производится по методу Е.Г. Попова.

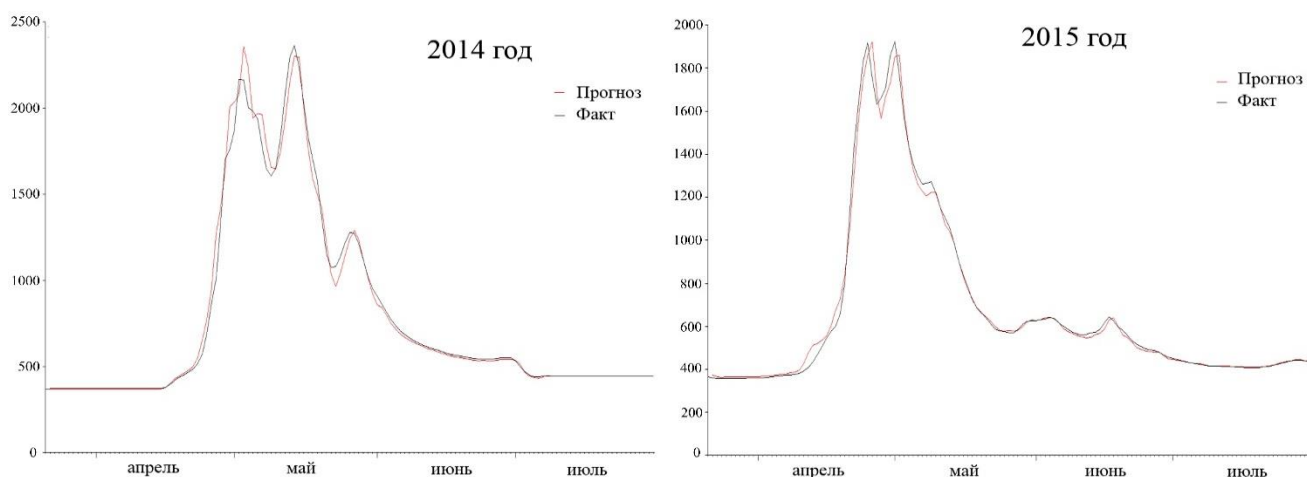
Оптимизация параметров модели выполнена с применением метода Розенброка, в котором используется преобразование на каждой итерации системы координат таким образом, чтобы в новой системе координат одна из осей совпадала с направлением предыдущего шага. Оптимизация выполнена по данным наблюдений гидрометеорологической сети за период 1978–2012 гг.

Оперативный прогноз бокового притока воды в водохранилище выполняется на основе данных наблюдений за уровнем воды рек-аналогов, рассчитанных значениях притока воды в водохранилище, а также метеорологического прогноза среднесуточной температуры и суточной суммы осадков метеорологических станций за период заблаговременности. Заблаговременность оперативных прогнозов притока воды ограничена заблаговременностью метеорологических прогнозов и составляет от 1 до 7 суток. На основе контрольных расчетов, выполненных по материалам независимых наблюдений в период 2013–2021 гг., были получены оценки прогностической способности модели. Обобщенные критерии качества прогнозов, характеризующие их точность, приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Показатели точности комбинированной модели краткосрочного прогноза бокового притока

| Заблаговременность прогноза, сутки | Средняя квадратичная ошибка прогноза S , м ³ /с | Среднее квадратичное отклонение расхода воды за период заблаговременности прогноза $\sigma\Delta$, м ³ /с | Критерий качества $S/\sigma\Delta$ |
|------------------------------------|--|---|------------------------------------|
| 1 | 54,6 | 94,9 | 0,58 |
| 2 | 90,5 | 182 | 0,50 |
| 3 | 114 | 260 | 0,44 |
| 4 | 129 | 331 | 0,39 |
| 5 | 139 | 395 | 0,35 |
| 6 | 146 | 453 | 0,32 |
| 7 | 158 | 507 | 0,31 |

На рисунке 6 представлены фактические и рассчитанные по модели гидрографы бокового притока воды в Богучанское водохранилище за 2014 и 2015 годы с заблаговременностью двое суток. Пример результатов моделирования приведен в диссертации (Приложение В).



а)

б)

Рисунок 6 – Гидрограф бокового притока в Богучанское водохранилище
— фактический приток; — прогноз с заблаговременностью 2 дня.

Полученные оценки качества модели и положительные результаты испытания методики прогноза позволяют рекомендовать её для оперативных краткосрочных прогнозов бокового притока воды в водохранилище Богучанской ГЭС.

В **заключении** сформулированы основные результаты и выводы диссертационного исследования:

1. В ходе исследования на основе физических представлений о закономерностях формирования стока составлена база доступных данных, включающая оценки значений более 100 возможных предикторов бокового притока в Богучанское водохранилище. С применением методов последовательного регрессионного анализа из этого множества переменных были выделены наиболее подходящие предикторы, характеризующие условия формирования бокового притока в это водохранилище.

Исследование результатов регрессионного анализа показало, что влияние предикторов квартального притока, характеризующих величину и ход осадков в период половодья, является существенно меньшим, чем предикторов, отражающих условия, сложившиеся в предшествующий ему осенне-зимний период. Благодаря этой особенности были разработаны методики прогноза бокового притока, в которых используются только предикторы, описывающие условия, сложившиеся до начала снеготаяния.

2. Прогноз весеннего стока с водосбора бокового притока в Богучанское водохранилище, основывается на определении запасов воды в снежном покрове и к оценке доли ее поглощения на территории этого бассейна. Ключевым фактором,

определяющим потери весеннего стока в рассматриваемых условиях, является осеннее увлажнение водосборов и другие факторы формирования водопроницаемости почв. Для их описания в работе успешно использованы комплексные показатели, которые определяются по данным об осеннем стоке рек-аналогов, температуре почвы за осенний период, среднемесячным осенним осадкам, суммам положительных температур в марте и другим доступным для прямой оценки характеристикам.

3. Расчет бокового притока, в условиях отсутствия регулярных наблюдений за стоком малых рек в рассматриваемом бассейне Богучанского водохранилища, может быть выполнен гидрометрическим методом с применением имеющихся данных по рекам-аналогам, расположенным на сопредельных с этим бассейном территориях. В работе использована методика расчета, основанная на данных наблюдений за боковым притоком в период с 1977 по 1987 годы, когда в бассейне водохранилища проводились гидрологические наблюдения на малых реках. Другой метод расчета бокового притока основывается на воднобалансовом соотношении и использовании информации о стоке р. Ангары в нижнем по течению створе (пос. Сыромолотово), и верхнем створе (Усть-Илимская ГЭС). Сравнение на пересекающемся временном интервале расчетных оценок притока, полученных водобалансовым и гидрометрическим методами, показало их близкую сходимость (коэффициент корреляции более 0,95). Этот результат позволил получить оценки бокового притока в Богучанское водохранилище с разным разрешением по времени, которые в дальнейшем были названы фактическими значениями бокового притока и использованы при создании методик его прогноза.

4. Разработаны три методики долгосрочного прогноза квартального бокового притока в Богучанское водохранилище в период половодья.

Первая методика основана на использовании эмпирических связей притока и различных гидрометеорологических характеристик, контролируемых на исследуемой территории. Оправдываемость расчета притока по рассматриваемому способу на обучающей и контрольной выборке имела значение, соответственно, 97% и 89%. На зависимом материале критерий точности аппроксимации (S/σ) фактических значений притока составил величину 0,37.

Вторая методика включает в себя предварительный прогноз стока рек-аналогов Мура, Чадобец и Непа и дальнейший пересчет его в прогноз бокового

притока в водохранилище. Оправдываемость этой методики прогноза на обучающей и контрольной выборке составила 91% и 89%, соответственно. Критерий качества S/σ на зависимом материале был равен 0,407.

В третьей методике используются дополнительные сведения о закономерностях формирования стока и описывающие их уравнения, вытекающие из инфильтрационно–ёмкостной модели Е.Г. Попова. Оправдываемость данной методики на обучающей выборке составила 94 %, на контрольной выборке - 100 %. Критерий S/σ на обучающей выборке имел значение 0,388. Эта методика прогноза бокового притока выглядит предпочтительней по сравнению с двумя другими, поскольку в ней используются уравнения аппроксимирующие зависимость стока от действующих факторов с учетом ее нелинейности. Однако в условиях оперативной работы целесообразно рекомендовать прогнозирование квартального притока по первой методике, в которой схема расчета менее трудоёмка.

5. Методика краткосрочного прогноза бокового притока в водохранилище Богучанской ГЭС с суточным разрешением по времени построена на основе концептуальной модели Д.А. Буракова. Эта модель включает в себя блоки, описывающие процессы снегонакопления, снеготаяния, поглощения воды на склонах, формирования склонового притока в русловую сеть, русловое добегание воды до замыкающего створа. Реализация модели позволяет детальнее исследовать режим формирования речного стока. Появляется возможность получения расчетных характеристик снегонакопления, снеготаяния и водоотдачи бассейна по высотным зонам. При построении модели применяются стандартные данные гидрометеорологических наблюдений (температура, осадки, уровни воды). В процессе адаптации модели применительно к водосбору бокового притока в Богучанское водохранилище также использовались наземные и спутниковые данные о состоянии снегового покрытия бассейна. Учет запасов воды в русловой сети по данным об ее уровнях на момент составления прогноза и аппроксимация их влияния на прогнозируемую характеристику существенно повышает точность модельных расчетов. Критерий качества методики краткосрочного прогноза бокового притока ($S/\sigma\Delta$) при различной его заблаговременности входит в интервал 0,31–0,58, что указывает на успешность прогнозов. Проведенные авторские испытания и прогнозы в оперативном режиме показали эффективность разработанной методики.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в научных изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Бураков Д.А. Краткосрочный прогноз бокового притока воды в водохранилище Богучанской ГЭС / Д. А. Бураков, **Л. А. Путинцев** // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2016. Т. 327. № 5. – С.65–74.
2. Бураков Д.А. Методы расчета и прогноза ежедневного бокового притока в Богучанское водохранилище / Д.А. Бураков, **Л.А. Путинцев** // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. – 2015. – №1. – С. 54–58.
3. **Путинцев Л.А.** Методика долгосрочного прогноза бокового притока воды в водохранилище Богучанской ГЭС на р. Ангаре /Л.А. Путинцев // Вестник Томского государственного университета. – 2015. – № 398. – С. 243–250.

Статьи в других изданиях:

4. **Putintsev L.A.** Providing a save service Boguchan HPS on the basis of prediction of water inflow to Bogychan reservoir // Applied Sciences and technologies in the United States and Europe: common challenges and scientific findings, proceedings of the 4th International scientific conference. Cibunet Publishing. – New York, 2013. – С. 5–7.
5. Бураков Д.А. Модели расчета и прогноза притока воды в водохранилище Богучанской ГЭС: DVD-ROM / Д.А. Бураков, **Л.А. Путинцев** // VII Всероссийский гидрологический съезд – Санкт-Петербург, 2013. – №136.
6. **Путинцев Л.А.** Компьютерная модель прогноза притока воды в водохранилище Богучанской ГЭС / Л.А. Путинцев // География и геэкология на службе науки и инновационного образования: мат-лы научн.конф с междунар. участием. – Красноярск: Изд-во КГПУ им. В.П. Астафьева, 2013. – С. 81–84.
7. **Путинцев Л.А.** Методика прогноза притока воды в водохранилище Богучанской ГЭС [Электронный ресурс] / Л.А. Путинцев // Тезисы стендовых докладов научно–практической школы–семинара молодых ученых и специалистов в области гидрометеорологии. – Новосибирск, 2012.– С. 12–13.– Режим доступа: <http://sibnigmi.ru/documents/school/> (дата обращения 01.09.2018).
8. **Путинцев Л.А.** О возможности расчета и прогноза бокового притока в Богучанское водохранилище / Л.А. Путинцев // Водные ресурсы Енисейского региона. Сборник материалов 12-й конференции, посвященной Международному дню воды – 22 марта. – Красноярск, 2017. – С. 14–20.