

УДК 556.048

О РЕЗУЛЬТАТАХ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ВЕСЕННЕГО ПОЛОВОДЬЯ НА ВЕРХНЕЙ ОБИ В 2015 ГОДУ*

© 2016 г. А.Т. Зиновьев, В.П. Галахов, К.Б. Кошелев

ФГБУН «Институт водных и экологических проблем Сибирского отделения Российской академии наук», г. Барнаул, Россия

Ключевые слова: речная сеть, Верхняя Обь, весеннее половодье 2015 г., имитационная прогнозная модель, одномерная гидродинамическая модель, прогностические расчеты, расходы и уровни воды.



А.Т. Зиновьев



В.П. Галахов



К.Б. Кошелев

Рассмотрены проблемы прогнозирования наводнений, обусловленных весенними половодьями на Верхней Оби. Представлены результаты среднесрочного прогнозирования объема первой волны половодья у г. Барнаула и краткосрочного

прогнозирования уровней весеннего половодья на Верхней Оби в 2015 г. Для среднесрочного прогноза половодья разработана методика, основанная на выявленной связи объема талого стока предгорных районов со средним коэффициентом снежности текущего года, зафиксированных на низкогорных гидрометеостанциях.

Среднесрочный прогноз объема первой волны половодья 2015 г. у г. Барнаула был выпущен с заблаговременностью один месяц, краткосрочный прогноз уровня воды на участке р. Оби от с. Фоминское до г. Камень-на-Оби в период половодья выдавался с заблаговременностью 3–5 дней. Близость результатов краткосрочных прогнозов с данными наблюдений показала, что разработанная компьютерная одномерная модель течений в системе русел Верхней Оби может быть успешно использована для краткосрочной оценки уровней затоплений пойменных территорий рассмотренного участка р. Оби при весенних половодьях и дождевых паводках, а также установления режима сбросов из Новосибирского водохранилища. Расхождение расчетных и натурных данных по уровням воды во время первой волны половодья 2015 г. в районе г. Барнаула не превысило 30 см.

* Работа выполнена в рамках проекта ФНИ № 0383-2014-0001 «Исследование процессов формирования стока и разработка информационно-моделирующих систем оперативного прогнозирования опасных гидрологических ситуаций для крупных речных систем Сибири»

Наводнения на реках, вызываемые весенними половодьями и летне-осенними дождевыми паводками, являются одними из наиболее опасных природных бедствий. Прогнозирование наводнений имеет большое научное и практическое значение для многих регионов России. Проблема прогнозирования наводнений для Сибири, обусловленных весенними половодьями на Верхней Оби, особенно актуальна, поскольку связана, с одной стороны, с защитой жизни, здоровья и благосостояния населения, проживающего на пойменных территориях Оби, с другой – имеет важное практическое значение при эксплуатации Новосибирского гидроузла в условиях пропуска больших объемов воды, когда необходимо обеспечить рациональное использование речного стока и защиту земель от затоплений [1, 2].

В связи с аномальными гидрометеорологическими условиями в предгорных районах Алтая в конце мая – начале июня 2014 г. наблюдалась чрезвычайная гидрологическая ситуация, обусловленная прохождением экстремального дождевого паводка в бассейне Верхней Оби [3]. Наводнение в Сибири затронуло Алтайский край, Республику Алтай, Туву и Хакасию. Были затоплены большие пойменные территории, подтоплены населенные пункты, разрушены мосты и гидротехнические сооружения, имелись человеческие жертвы. Ущерб от наводнения в Алтайском крае оценен почти в 5 млрд руб. [4]. К концу зимы 2014–2015 гг. на равнинных и предгорных водосборах Верхней Оби сформировались высокие запасы снега. С учетом катастрофического наводнения 2014 г. и ожидаемой большой водности Оби в период снеготаяния, различным прогнозам весеннего половодья 2015 г. было уделено особое внимание. Ниже рассматриваются результаты среднесрочного и краткосрочного прогнозирования объема и уровней половодья на р. Обь в 2015 г. Среднесрочный прогноз объема первой волны половодья 2015 г. у г. Барнаула был выпущен в конце марта, краткосрочный прогноз уровней воды на участке р. Оби от с. Фоминское до г. Камень-на-Оби в период половодья (май-июнь) выдавался с заблаговременностью 3–5 дней.

ГИДРОЛОГИЧЕСКИЙ РЕЖИМ ВЕРХНЕЙ ОБИ

Обь, образуемая в результате слияния рек Бия и Катунь, стекающих с Алтайских гор, является типичной равнинной рекой. Однако ее водный режим формируется не только на равнине, но и в горах. В верхнем течении р. Оби (от места слияния Бии и Катунь до г. Новосибирска) отмечаются две волны половодья: одна – в начале, другая – в конце периода высоких вод. Первая волна обусловлена таянием снега на равнинной части водосбора и в предгорьях Алтая и получает значительное пополнение за счет впадающих в Обь рек Песчаная, Ануй, Чарыш, Алей, Чумыш и др. Ее максимум наблюдается в середине апреля – начале мая. Вторая волна формируется при

таянии горных снегов и ледников, образуется преимущественно за счет вод Катунь, Бий, Чарыш и проходит в июне-июле. Вследствие этих особенностей весенне-летний гидрограф стока Верхней Оби имеет пилообразный вид с преобладанием двух четко выраженных максимумов [5].

Прогноз гидрологического режима р. Оби в период половодья является основой для подготовки вероятных сценариев затопления ее пойменных территорий и обоснованием для построения графика заполнения Новосибирского водохранилища. Этот прогноз опирается на данные о метеорологических условиях на территории водосборного бассейна в холодный период. Накопление снега в целом предопределяет важную для всей изучаемой территории характеристику водного режима – объем весенне-летнего половодья.

В зимний период 2014–2015 гг. на равнинных водосборах Верхней Оби наблюдалось выпадение значительного количества твердых осадков. Снегозапасы в предгорьях Алтая также были существенны: зимой снега выпало больше среднесуточной нормы. Поэтому естественно было ожидать при весеннем потеплении достаточно большую по объему первую волну половодья, вызванную таянием снега на равнинах и в предгорьях. В предположении большой водности рек бассейна Верхней Оби в период весеннего снеготаяния были выполнены среднесрочный и краткосрочный прогнозы половодья 2015 г. на р. Обь.

СРЕДНЕСРОЧНЫЙ ПРОГНОЗ ОБЪЕМА ПЕРВОЙ ВОЛНЫ ПОЛОВОДЬЯ

Наблюдаемый сток р. Оби у г. Барнаул формируется за счет таяния снега на равнинных и горных водосборах. Для примера на рис. 1–4 приведены среднесуточные расходы (Q) р. Оби для г/п Обь–Барнаул ($Q_{О-Б}$), г/п Катунь–Сростки ($Q_{К-С}$), г/п Бия–Бийск ($Q_{Б-Б}$) и их разница $\Delta Q = Q_{О-Б} - (Q_{К-С} + Q_{Б-Б})$ за весенне-летние месяцы отдельных лет. Как правило, гидрограф р. Оби на г/п Барнаул характеризуется двумя максимумами, первый из которых определяется равнинными и низкогорными притоками, второй – стоком среднегорья и высокогорья (рис. 1, 3).

Для оценки объемов стока предгорных районов верховьев Оби установим средний многолетний годовой сток в створах Обь–Барнаул и Обь–Фоминское, разница которых характеризует сток рек Песчаная, Ануй, Алей, Чарыш. Кроме стока левобережных притоков Оби на рассматриваемом участке реки определим сток низкогорных районов бассейна р. Бия по разнице стока на участке Бия–Бийск и Бия–Турочак (табл. 1).

Из данных табл. 1 следует, что средний многолетний сток низкогорных районов составляет около 30 % от среднего многолетнего стока р. Оби у г. Барнаул.

Таблица 1. Средний многолетний сток на выделенных участках рек Обь и Бия

Река	Гидрологический пост (г/п)	Среднемноголетние объемы стока, км ³ /год
Обь	Барнаул	46,4
Обь	Фоминское	37,5
Разница стока р. Оби		8,9
Бия	Бийск	15,0
Бия	Турочак	9,8
Разница стока р. Бия		5,2

Анализ материалов по расположению метеорологических станций в горных районах верховий Оби показывает, что наиболее обеспечены метеорологическими наблюдениями именно низкогорные районы. По данным о средних месячных температурах и суммах месячных осадков на метеорологических станциях верховий р. Оби по 2001 г. включительно выполнена оценка коэффициентов снежности $K_{сн}$ (отношение слоя осадков данного года за холодный период к среднему многолетнему) зим с 1967–1968 по 2000–2001 гг. Выбор начала периода наблюдений определялся тем, что к 1967 г. на сети метеорологических станций и постов закончилась замена дождемеров с защитой Нифера на осадкомеры с защитой Третьякова; время окончания – имеющимися в наличии данными об осадках предгорных метеостанций. Таким образом, в качестве исходной информации для составления среднесрочных прогнозов использована разница весеннего стока в створах Обь–Барнаул, Катунь–Сростки и Бия–Бийск, определенная с использованием соотношения для ΔQ за период с 1968 по 2001 гг. и с учетом времени добегания около 5 суток (к примеру, рис. 2, 4).

Анализ гидрографов стока показал следующее. В большинстве случаев, когда в мае-июне выпадают значительные жидкие осадки, талый сток низкогорных районов выделяется плохо и требуются специальные методы для его оценки (рис. 2). При малом количестве осадков в мае-июне талый сток низкогорных районов выделяется достаточно хорошо (рис. 4).

Для прогнозной оценки объема талого стока предгорных территорий бассейна Верхней Оби (V) использована выявленная связь данного объема со средним (по восьми станциям) коэффициентом снежности текущего года $K_{сн, сред}$ на метеорологических станциях низкогорий: Змеиногорск, Краснощеково, Солонешное, Чарышское, Кызыл-Озёк, Турочак, Чемал и Шебалино (рис. 5).

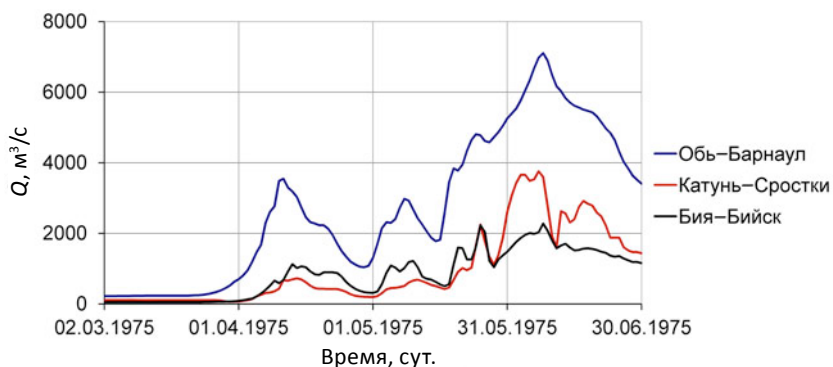


Рис. 1. Среднесуточные расходы на г/п Обь – Барнаул $Q_{О-Б}$, Катунь – Сростки $Q_{К-С}$, Бия – Бийск $Q_{Б-Б}$ в период весеннего половодья 1975 г.

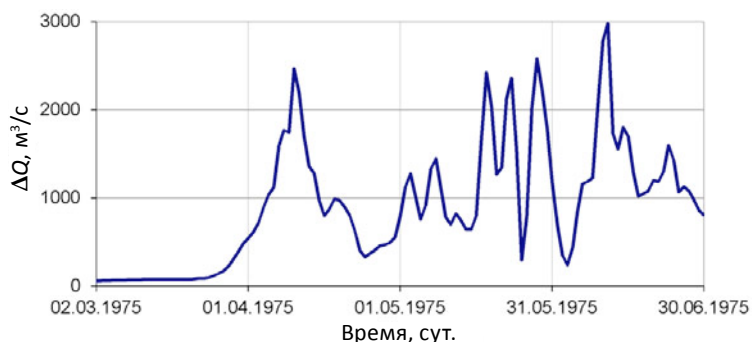


Рис. 2. Разница среднесуточных расходов ΔQ для г/п Обь – Барнаул, Катунь – Сростки, Бия – Бийск в период весеннего половодья 1975 г.

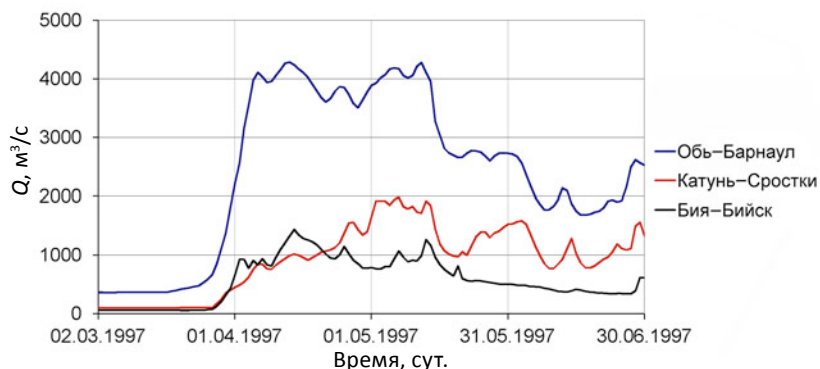


Рис. 3. Среднесуточные расходы на г/п Обь – Барнаул $Q_{О-Б}$, Катунь – Сростки $Q_{К-С}$, Бия – Бийск $Q_{Б-Б}$ в период весеннего половодья 1997 г.



Рис. 4. Разница среднесуточных расходов ΔQ для г/п Обь – Барнаул, Катунь – Сротски и Бия – Бийск в период весеннего половодья 1997 г.

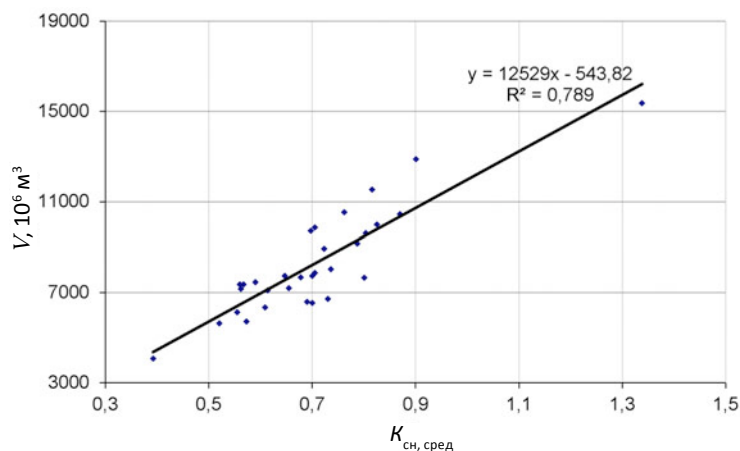


Рис. 5. Зависимость объема стока первой волны весеннего половодья у г. Барнаула: V (талый сток низкогорий) от $K_{\text{сн, сред}}$ (рассматриваемый период 1968–2001 гг.).

Анализ условий формирования поверхностного стока на малом горном водосборе р. Локтевка показывает, что годовой сток тесно увязан с половодьем [6]. За период половодья формируется от 80 (многоводные годы) до 40 % (маловодные годы) годового стока. Объемы стока в период весеннего половодья в основном обусловлены зимними осадками (или запасами снега) в бассейне. Для оценки снеготазов на равнинных и предгорных водосборах Верхней Оби для зимы 2014–2015 гг. были использованы суммы месячных осадков с ноября по март по метеостанциям предгорий (8 метеостанций). Расчеты коэффициентов снежности $K_{\text{сн}}$ показали, что в текущую зиму величина $K_{\text{сн, сред}}$ должна быть равна 0,79 при среднем значении коэффициента снежности $K_{\text{сн, сред}} = 0,72$ за период с 1968 по 2001 гг. В соответствии

с рассчитанной величиной $K_{\text{сн,ср}} = 0,79$, объем талого стока с предгорных водосборов в период снеготаяния 2015 г. должен быть равен 9274 ± 1037 млн м³. Отношение коэффициента снежности текущего года к среднему за период 1968–2001 гг. равно 1,11; для объема первой паводочной волны его отношение к среднемуголетнему – 1,19 (рис. 5). Таким образом, при условии, что в период снеготаяния (апрель–май 2015 г.) не выпадет значительных жидких осадков, объем первой волны половодья у г. Барнаула был спрогнозирован немногим больше (примерно на 20 %) среднего многолетнего.

Предварительный прогноз объема первой волны половодья у г. Барнаула был выпущен в конце марта 2015 г. с использованием величины средне-многолетних снегозапасов за март, окончательный – в начале апреля после обработки данных о снегозапасах за март 2015 г.

КРАТКОСРОЧНЫЙ ПРОГНОЗ УРОВНЕЙ ВОДЫ

Примеры расчетов затопления пойменных территорий с использованием различных математических моделей на основе уравнений Сен-Венана можно найти во многих работах [7–10], для чего применяются как известные программные продукты типа MIKE 11, HEC-RAS [9, 11], так и оригинальные разработки [7, 8, 10]. Для описания течений на участках рек, в т. ч. и со сложной морфометрией русла и поймы, в Институте водных и экологических проблем Сибирского отделения Российской Академии наук (ИВЭП СО РАН) разработаны вычислительные комплексы на основе одномерных и двумерных уравнений Сен-Венана и построены компьютерные модели для расчета сценариев затопления отдельных участков пойменных территорий и прогноза прохождения весенних половодий и дождевых паводков на Верхней Оби [3, 12]. Использование методов математического моделирования позволило по данным о подъеме уровней воды на р. Оби (г/п Фоминское ниже г. Бийска) и ее крупных притоках (реки Чарыш, Алей, Чумыш) с заблаговременностью до 3–5 дней дать прогноз максимальных уровней у городов Барнаул и Камень-на-Оби в период экстремального дождевого паводка на Алтае в 2014 г. [3].

Расчет гидравлических характеристик р. Оби на участке от г/п Фоминское до створа плотины Новосибирской ГЭС опирается на численную одномерную горизонтальную (1DH) модель течения на основе уравнений Сен-Венана. Для построения компьютерной гидродинамической 1DH-модели течения на участке р. Оби от г/п Фоминское до створа плотины Новосибирской ГЭС используются цифровые модели речной долины р. Оби и ложа Новосибирского водохранилища, гидрологические данные по связи расходов и уровней на гидростаях [3]. Компьютерная 1DH-модель реализована в среде Delphi 2007, что позволяет обеспечить удобное хранение данных с применением СУБД Firebird.

Работы по усовершенствованию компьютерной гидродинамической 1DH-модели течения на Верхней Оби были продолжены, что заключалось в дополнительной калибровке модели течения на участке Оби от г/п Фоминское до г/п Камень-на-Оби с использованием ограниченного набора натуральных данных для больших расходов воды в 2014 г. Калибровка компьютерной модели была связана с уточнением вида кривой связи расходов и уровней в створе г/п Фоминское. В результате выполненной калибровки удалось уменьшить расхождение расчетных и натуральных данных по уровню водной поверхности в пики половодий. Дополнительно выполнены оценки влияния процессов испарения и инфильтрации на расчетные значения уровней воды в период прохождения больших расходов.

С использованием уточненной компьютерной 1DH-модели выполнены прогностические расчеты уровней весеннего половодья на участке Оби от г/п Фоминское до г/п Камень-на-Оби в 2015 г. В расчетах использованы данные Гидрометцентра по расходам в начальном створе расчетного участка и на притоках в апреле–июне 2015 г. На рис. 6. представлены рассчитанные распределения уровней водной поверхности Z на 05.05.2015 (пик половодья у г. Барнаула) и на 15.06.2015 вдоль русла р. Оби на участке г/п Фоминское – г/п Камень-на-Оби. Отметим, что положению створа г/п Камень-на-Оби соответствует значение $x = 0$; для створа г/п Барнаул $x = 240$ км. Близость кривых уровней на 150-километровом участке реки ниже г/п Фоминское связана с нестационарным характером прохождения волны половодья и быстрым спадом максимальных уровней воды.

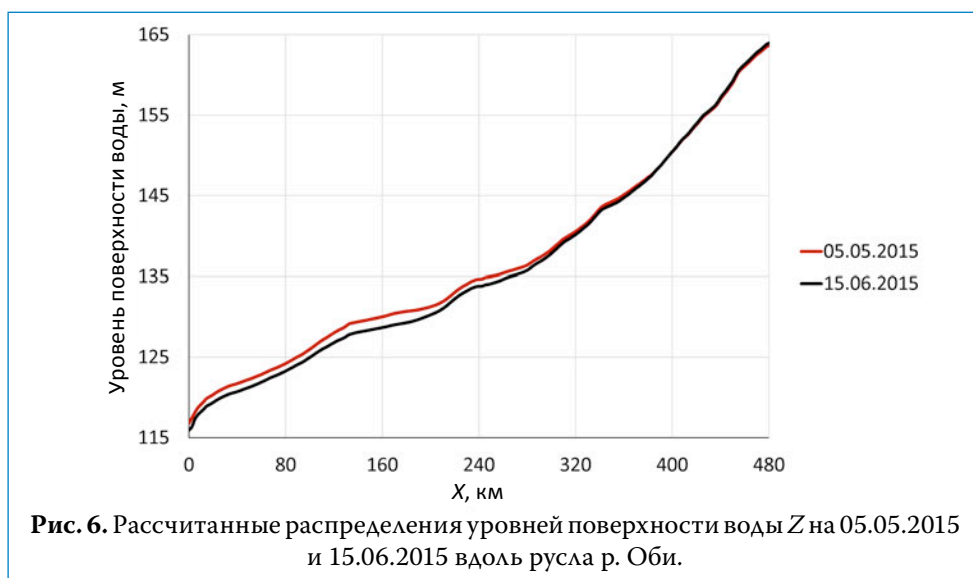


Рис. 6. Рассчитанные распределения уровней поверхности воды Z на 05.05.2015 и 15.06.2015 вдоль русла р. Оби.

Для г. Барнаула опасным является уровень воды 500 см над нулем гидрологического поста. Критическим уровнем считается уровень 520 см, с превышением которого происходит существенное затопление пойменной территории. На рис. 7 представлены гидрографы уровня воды у г/п Барнаул (прогнозные и фактические) в мае-июне 2015 г. Максимальный расчетный уровень воды у г. Барнаула, который был спрогнозирован, равен 584 см. Максимальный уровень воды, наблюдаемый у г. Барнаула 5 мая 2015 г., равнялся 603 см (обеспеченность 20 %).

Начиная с 1 мая расхождение расчетных и натурных данных по уровням воды во время первой волны половодья 2015 г. в районе г. Барнаула не превысило 30 см. В период до 1 мая более существенное различие расчетных и натурных данных по уровням воды обусловлено заданием неточного начального условия, полученного в результате решения квазистационарной гидравлической задачи. Несмотря на присущие 1ДН-модели ограничения, результаты расчетов хорошо качественно и количественно согласуются с натурными данными. Заблаговременность прогнозов по г/п Барнаул – до 3 дней.

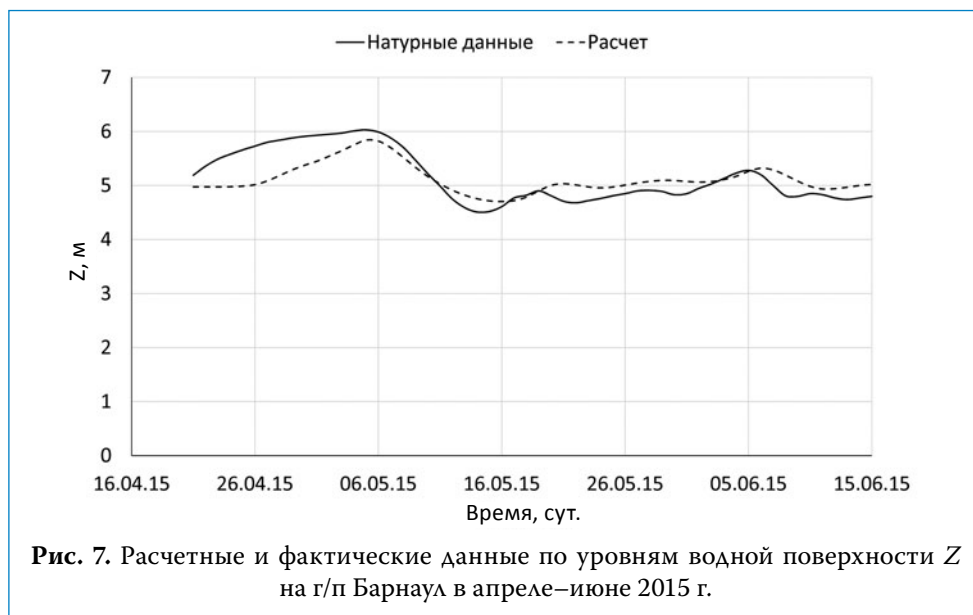


Рис. 7. Расчетные и фактические данные по уровням водной поверхности Z на г/п Барнаул в апреле–июне 2015 г.

ВЫВОДЫ

В работе рассмотрены среднесрочные и краткосрочные прогнозы наводнений, обусловленных весенними половодьями на Верхней Оби и представлены результаты прогнозирования для весеннего половодья на Верхней Оби в 2015 г.

Для среднесрочного прогноза половодья г. Барнаула разработана методика, основанная на выявленной связи объема талого стока предгорных районов со средним коэффициентом снежности текущего года на низкогорных ГМС (Змеиногорск, Краснощеково, Солонешное, Чарышское, Кызыл-Озёк, Турочак, Чемал и Шебалино). Среднесрочный прогноз объема первой волны половодья 2015 г. с использованием данных текущего года был выпущен в начале апреля 2015 г. (заблаговременность – 1 месяц). Расчет по коэффициенту снежности показал, что объем первой волны половодья будет примерно на 20 % выше среднего многолетнего, если в период снеготаяния (апрель-май) не будет выпадать значительных жидких осадков. Если от прогнозов объемов стока у г. Барнаула перейти формально к уровням, то ожидаемые уровни воды будут примерно 600 см над нулем г/п Барнаул, что хорошо подтвердилось именно для данного года. Следует отметить, что в общем случае развитие весеннего половодья существенно определяется метеорологическими условиями (ход температуры воздуха, жидкие осадки) на водосборе Верхней Оби в апреле-мае каждого конкретного года.

На основе доработанной с учетом процессов испарения и инфильтрации компьютерной одномерной горизонтальной (1DH) модели течения на участке р. Оби от с. Фоминское до г. Камень-на-Оби с использованием оперативных данных Гидромета на основных гидропостах выполнены прогнозы уровней воды на Верхней Оби в период весеннего половодья 2015 г., в т. ч. рассчитан с заблаговременностью до нескольких дней (3–5 дней) гидрограф у г/п Барнаул. Спрогнозированные и реально наблюдаемые максимальные уровни воды у г. Барнаула совпали с точностью до 0,2 м.

Близость результатов краткосрочных прогнозов с данными наблюдений, в т. ч. по уровням воды на г/п Барнаул, показала, что разработанная компьютерная одномерная модель течений в системе русел Верхней Оби может быть успешно использована для краткосрочной оценки уровней затоплений пойменных территорий рассмотренного участка р. Оби при весенних половодьях и дождевых паводках, а также при установлении режима сбросов из Новосибирского водохранилища.

Для развития методов среднесрочного прогнозирования половодья на Верхней Оби (к примеру, максимальных уровней воды) является важным как дальнейшее уточнение снегозапасов на равнинных и предгорных водосборах, так и выявление новых статистических связей между характеристиками гидрологического режима реки на различных ее участках. Для повышения точности краткосрочного прогнозирования наиболее актуальными вопросами в настоящее время следует считать получение более подробных данных о морфометрии и распределенной боковой приточности для исследуемого участка р. Оби. Исследования в данных направлениях выполняются в ИВЭП СО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Васильев О.Ф.* Создание систем оперативного прогнозирования половодий и паводков // Вестник РАН. 2012. № 3. С. 237–242.
2. *Васильев О.Ф., Семчуков А.Н.* Создание современных систем оперативного прогнозирования половодий и паводков как один из путей модернизации средств управления работой гидроэлектростанций в многоводные периоды // Гидротехническое строительство. 2012. № 2. С. 21–26.
3. *Зиновьев А.Т., Кошелев К.Б., Дьяченко А.В., Коломейцев А.А.* Экстремальный дождевой паводок 2014 г. в бассейне Верхней Оби: причины, прогноз и натурные наблюдения // Водное хозяйство России. 2015. № 6. С. 93–104.
4. Новости Алтая [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://newsaltay.ru/index.php?dn=news&id=10660&to=art>.
5. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 15. Алтай и Западная Сибирь. Вып. 2. Средняя Обь / под ред. Н.А. Паниной. Л.: Гидрометеиздат, 1972. 409 с.
6. *Галахов В.П., Белова О.В.* Формирование поверхностного стока в условиях изменяющегося климата (по исследованиям в бассейне Верхней Оби). Барнаул: Изд-во АлтГУ, 2009. 93 с.
7. *Алексеевский Н.И., Крыленко И.Н., Беликов В.В., Кочетков В.В., Норин С.В.* Численное гидродинамическое моделирование наводнения в г. Крымске 6–7 июля 2012 г. // Гидротехническое строительство. 2014. № 3. С. 29–35.
8. *Беликов В.В., Зайцев А.А., Милитеев А.Н.* Математическое моделирование сложных участков русел крупных рек // Водные ресурсы. 2002. Т. 29. № 6. С. 698–705.
9. *Лепихин А.П., Перепелица Д.И., Тиунов А.А.* Анализ и обоснование возможных схем защиты г. Кунгура от наводнений // Водное хозяйство России. 2007. № 2. С. 80–93.
10. *Храпов С.С., Хоперсков А.В., Кузьмин Н.М., Писарев А.В., Кобелев И.А.* Численная схема для моделирования динамики поверхностных вод на основе комбинированного SPH-TVD подхода // Вычислительные методы и программирование. 2011. Т. 12. С. 282–297.
11. *Данилов-Данильян В.И., Гельфан А.Н., Мотовилов Ю.Г., Калугин А.С.* Катастрофическое наводнение 2013 года в бассейне реки Амур: условия формирования, оценка повторяемости, результаты моделирования // Водные ресурсы. 2014. Т. 41. № 2. С. 111–122.
12. *Зиновьев А.Т., Кошелев К.Б.* Моделирование процесса затопления пойменных территорий для участков крупных рек со сложной морфометрией русла и поймы // Водное хозяйство России. 2013. № 6. С. 17–31.

Сведения об авторах:

Зиновьев Александр Тимофеевич, д-р техн. наук, заведующий лабораторией, ФГБУН «Институт водных и экологических проблем Сибирского отделения Российской академии наук» (ИВЭП СО РАН), Россия, 656038, г. Барнаул, ул. Молодежная, 1; e-mail: zinoviev@iwer.ru

Галахов Владимир Прокопьевич, канд. геогр. наук, доцент, старший научный сотрудник, ФГБУН «Институт водных и экологических проблем Сибирского отделения Российской академии наук» (ИВЭП СО РАН), Россия, 656038, г. Барнаул, ул. Молодежная, 1; e-mail: galahov@iwer.ru

Кошелев Константин Борисович, канд. физ.-мат. наук, доцент, старший научный сотрудник, ФГБУН «Институт водных и экологических проблем Сибирского отделения Российской академии наук» (ИВЭП СО РАН), Россия, 656038, г. Барнаул, ул. Молодежная, 1; e-mail: koshelev@iwer.ru