

О РЕЗУЛЬТАТАХ ОПЕРАТИВНЫХ ИСПЫТАНИЙ МЕТОДОВ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ПРОГНОЗОВ НА РЕКАХ ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ В ПЕРИОД ВЕСЕННЕГО ПОЛОВОДЬЯ

Прогноз ежедневных уровней воды р. Большой Пит у п. Брянка

Река Большой Пит – правый приток Енисея, относится к временно судоходным рекам. Навигация осуществляется на протяжении 184 км от устья до п. Брянка. Завоз грузов по реке начинается после выхода льда с притоков, спустя 4–5 дней после ледохода. На волне половодья в ограниченные сроки суда с грузом должны успеть зайти в верховья и в дальнейшем безопасно спуститься к Енисею. Продолжительность навигационного периода варьируется от 1 до 30 суток. Для обеспечения запросов судоходства в трудных условиях короткого навигационного периода в ФГБУ «Среднесибирское УГМС» была разработана методика прогноза водности в весенний период.

Большой Пит протекает в юго-западном направлении по юго-восточным отрогам Енисейского кряжа. Площадь водосбора до створа п. Брянка составляет 21700 км², притоки в большинстве своем – горные реки. Прорезая платообразные возвышенности и гряды, сложенные траппами и другими изверженными породами, реки образуют глубокие врезанные в скалы долины, ограниченные крутыми склонами. Преобладающие высоты местности базовых станций (БС) 500–700 м, при максимальной – 1104 м. Русло однорукавное, немеандрирующее, изобилует порогами, шиверами, перекатами.

Доля стока за половодье в общем объеме годового стока составляет 60 %. Водность в этот период увеличивается по сравнению с зимним стоком в 60–120 раз (от 15–20 м³/с в апреле до 1500–2500 м³/с в период прохождения пика половодья). Снеговая доля в весеннем половодье составляет 81 %, дождевая – 15 %, грунтовая – 4 %.

Таяние снега происходит неравномерно, начинаясь в наиболее низких местах переходит к более высоким частям бассейна. При дружной весне питание рек талыми водами носит нарастающий характер,

и половодье проходит одной высокой волной. Возвраты холодов нарушают плавность развития половодья, в силу чего оно часто представляет собой серию волн. На спаде половодья могут формироваться невысокие дождевые паводки (рис. 1).

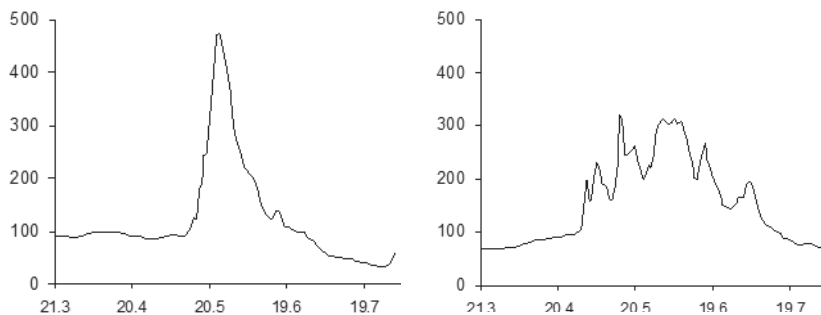


Рис. 1. График колебания уровней воды р. Большой Пит у п. Брянка в 1989 г. (слева) и в 2009 г. (справа).

Краткое описание метода

Гидролого-математическая модель, применяемая для прогнозов стока сибирских рек, использует не только наземную информацию в пунктах гидрометеорологических наблюдений, но также спутниковую информацию о динамике площади снегового покрытия территории, что особенно важно в условиях ограниченного гидрометеорологического обеспечения прогнозов. Алгоритмическое описание модели рассмотрено в [1, 2].

Программное обеспечение, разработанное на основе гидролого-математической модели, позволяет путем численных экспериментов моделировать величины ежедневных уровней воды. Известные к моменту выпуска прогноза максимальные запасы воды в снежном покрове, характеристики предшествующего увлажнения бассейна, ежедневные температуры воздуха и суточные осадки определяются по фактическим данным наблюдений. В период весеннего снеготаяния происходит оперативная коррекция рассчитанных покрытий водосбора снегом фактическими данными, определенными по данным наблюдений из космоса.

По степени изученности гидрометеорологических процессов Большой Пит является сложным объектом для прогнозирования.

О предвесеннем распределении снеготопливных запасов в бассейне можно судить только по данным наблюдений в замыкающем створе на гидрометеорологическом посту Брянка и на части автодорожного снеготопливного маршрута г. Енисейск – г. Северо-Енисейск. Корреляционный анализ показал отсутствие значимой связи данных наблюдений за снегом на посту Брянка с объемом половодья. Других снеготопливных наблюдений в бассейне не производится.

О суточном ходе температуры воздуха и количестве осадков можно судить по данным ближайших к бассейну (по меркам Восточной Сибири) метеостанций Северо-Енисейск, Енисейск и Мотыгино. В пределах расчетного бассейна метеорологические наблюдения не ведутся.

Наблюдения за водным режимом в расчетном бассейне производятся только в замыкающем створе. На их основе проводится расчет характеристики предшествующего (осеннего) увлажнения и русловых запасов.

Пункты гидрометеорологических наблюдений, включенных в разработку методики, представлены в табл. 1.

Таблица 1

**Данные информационной базы наблюдений для реализации модели прогноза
р. Большой Пит – п. Брянка**

Снеготопливные съемки	Ежедневные осадки	Температура воздуха	Уровни воды
1. Автодорожный маршрут г. Енисейск – г. Северо-Енисейск (149–560 м БС)	1. М. Северо-Енисейск (513 м БС) 2. М. Енисейск (77 м БС) 3. М. Мотыгино (161 м БС)		1. ГП р. Большой Пит – п. Брянка

Оперативные испытания метода прогноза

Испытания метода прогноза ежедневных уровней воды проводились в оперативном режиме в период отсутствия ледовых явлений 2013–2014 гг. с мая по июнь.

В электронную базу данных заносилась оперативная гидрометеорологическая фактическая информация с сети и краткосрочный прогноз погоды по опорным станциям.

Результатом расчета являются прогнозы уровней воды заблаговременностью 1–2 суток. За период 2013–2014 гг. для р. Большой Пит у п. Брянка было выпущено 139 прогнозов, средняя оправдываемость за 2 года краткосрочного прогноза уровней воды характеризуется как удовлетворительная, составив на 1 и 2-е сутки – 69 %.

Выдаче прогноза большей заблаговременности препятствует отсутствие гидрометеорологических наблюдений непосредственно в расчетном бассейне. Этим обстоятельством объясняется и невысокая оправдываемость методики. В то же время, практика использования метода показывает, что метод удовлетворительно описывает тенденции изменения уровней воды, что является критически важным для судоходства.

Рекомендации к внедрению

Учитывая результаты оперативных испытаний метода прогноза ежедневных уровней воды в период весеннего половодья в 2013–2014 гг., Технический совет Среднесибирского УГМС в своем решении от 20 ноября 2014 г. рекомендовал внедрить в отделе гидрологических прогнозов Гидрометцентра ФГБУ «Среднесибирское УГМС» расчетный метод прогноза ежедневных уровней воды р. Большой Пит у п. Брянка в период весеннего половодья заблаговременностью 1–2 суток для речной отрасли в качестве консультативного.

Прогноз ежедневных уровней воды р. Оя у с. Ермаковское

Площадь бассейна р. Оя до поста с. Ермаковское 2540 км², длина реки 174 км. Река берет начало из оз. Ойского, расположенного на южных отрогах хр. Кулумыс на высоте 1420 м. В верховьях носит название Большая Оя.

Высота окружающих хребтов: Березовского 1400–1800 м, Ойского 1600–1800 м, Ергаки 1600–2100 м, Кедранского 1000–1200 м. Гребни гор на хребтах и их отрогах узкие, местами скалистые. Крутизна склонов достигает 30–50°. На вершинах и склонах гор встречаются каменистые россыпи. В предгорной части холмистые вершины плоские, округлые.

Долины рек в верховьях узкие и глубокие (щели и ящикообразный тип долин), по выходу на равнину расширяются (корытообразный тип долины). Питание рек снегодождевое.

Грунты в горной части скальные и полускальные, с островной мерзлотой. Ниже переходят в щебеночно-суглинистые и суглинистые. На равнине грунты песчано-галечниковые, в поймах рек галечниковые, галечниково-гравийные.

Леса на верхней границе (1500–1700 м) представлены кедром. Ниже по склонам произрастают хвойные породы: кедр и пихта с примесью лиственных пород. На склонах и перевалах встречаются болота с толстым сфагново-моховым покровом. На высотах 400–900 м склоны и вершины гор и холмов покрыты смешанным лесом.

Краткое описание метода

Метод прогноза реализован на основе концептуальной модели, использующей всю доступную оперативную информацию – наземную (температура воздуха, осадки, расходы и уровни воды в замыкающем створе и в речной системе) и спутниковую (динамику снегового покрытия территории водосбора). Описание структуры модели дано в [1, 2].

Водный режим характеризуется весенне-летним половодьем с максимумом во второй половине мая – начале июня. Гидрограф стока в дружные весны близок к одновершинному, но чаще, по причине возврата холодов и выпадения осадков, многопиковый (рис. 2). Половодье длится около 100 дней, в это время проходит в среднем 50 % годового стока. Очень высокая водность формируется, как правило, при наложении дождевой составляющей на снеготаяние в горной части бассейна.

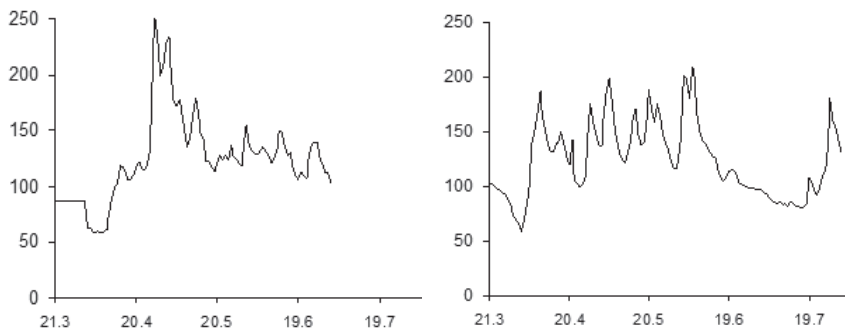


Рис. 2. График колебания уровней воды р. Оя у с. Ермаковское в 2013 г. (слева) и в 2009 г. (справа).

Гидрометеорологический режим «по сибирским меркам» довольно хорошо изучен. Наблюдения за температурой воздуха, осадками и снежным покровом проводятся как на равнине, так и в верховьях реки. Стоит отметить неразвитость сети гидрометрических пунктов. Кроме замыкающего створа, наблюдения на водосборе ведутся на одном малом ручье в горной местности. Дополнительно привлечена информация об уровнях воды на ближайшем водотоке – р. Кебеж.

Пункты гидрометеорологических наблюдений, включенных в разработку методики, представлены в табл. 2.

Таблица 2

**Данные информационной базы наблюдений для реализации модели прогноза
р. Оя – с. Ермаковское**

Снегомерные съемки	Ежедневные осадки	Температура воздуха	Уровни воды
1. М. Северо-Енисейск (513 м БС) 2. М. Енисейск (77 м БС) 3. М. Мотыгино (161 м БС)			1. ГП р. Оя – с. Ермаковское 2. ГП р. Оленья Речка – Оленья Речка 3. ГП р. Кебеж – с. Григорьевка

Оперативные испытания метода прогноза

Испытания метода прогноза ежедневных уровней воды проводились в оперативном режиме в период отсутствия ледовых явлений 2013–2014 гг. с апреля по июнь.

В электронную базу данных заносилась оперативная гидрометеорологическая фактическая информация с сети и краткосрочный прогноз погоды по опорным станциям.

Результатом расчета являются прогнозы уровней воды заблаговременностью 1–3 суток. За период 2013–2014 гг. для р. Оя у с. Ермаковское было выпущено 507 прогнозов, оправдываемость краткосрочного прогноза уровней воды, средняя за 2 года, характеризуется как хорошая, составив на 1-е сутки – 88 %; на 2-е сутки – 86 %; на 3-и сутки – 87 %.

Высокая оправдываемость метода прогноза обусловлена удовлетворительной гидрометеорологической изученностью в речном бассейне, небольшими размерами водосбора и однородностью закономерностей распределения факторов формирования стока вверх по склону.

Рекомендации к внедрению

Учитывая результаты оперативных испытаний метода прогноза ежедневных уровней воды в период весеннего половодья в 2013–2014 гг., Технический совет Среднесибирского УГМС в своем решении от 20 ноября 2014 г. рекомендовал внедрить в отделе гидрологических прогнозов Гидрометцентра ФГБУ «Среднесибирское УГМС» метод прогноза ежедневных уровней воды р. Оя у с. Ермаковское в период весеннего половодья заблаговременностью 1–3 суток в качестве основного расчетного метода.

Прогноз максимальных уровней воды р. Подкаменная Тунгуска у факт. Кузьмовка

Река Подкаменная Тунгуска – одна из крупнейших рек Средней Сибири, протекающая в зоне средней тайги и многолетнемерзлых пород, с преимущественно снеговым питанием. Ее бассейн расположен в пределах Средне-Сибирского плоскогорья. Река стекает с приподнятой юго-восточной части плоскогорья (Ангарский кряж), далее течет на северо-запад по возвышенному Тунгусскому плато, впадая в Енисей в районе 61 °с.ш. Длина реки 1865 км, площадь бассейна 240 тыс. км².

В основу разработки прогностического уравнения максимальных уровней воды на р. Подкаменная Тунгуска у факт. Кузьмовка положен анализ условия формирования максимальных уровней воды (как заторного, так и беззаторного генезиса) [3–6]. Этот анализ позволил обосновать исходные предикторы и уравнение множественной линейной регрессии.

Уравнение для прогноза максимальных уровней учитывает характер снегонакопления в бассейне, пропускную способность русла к началу вскрытия и предшествующее увлажнение бассейна. Предикторы подбирались исходя из физических соображений, далее был проведен анализ их репрезентативности на основе корреляции с максимальными уровнями воды.

Уравнение для прогноза имеет вид:

$$H_{\max} = S + \Delta H + Q - D + 933. \quad (1)$$

Обозначения комплексных показателей в этом уравнении приведены в табл. 3. Характеристики его точности: множественный $R = 0,85$; R -квадрат = 0,73; $S/\sigma = 0,60$; длина обучающей выборки = 44.

**Параметры уравнения регрессии для прогноза максимального уровня воды
р. Подкаменная Тунгуска – факт. Кузьмовка**

Переменная в уравнении (1)	Смысловое значение
S	<p>Комплексный показатель снегонакопления в бассейне в конце зимы</p> $S = (8,45 \cdot S_{\max \text{ Муторай}} - 8,33 \cdot S_{31.III \text{ Муторай}}) + (2,03 \cdot S_{10.04 \text{ Байкит}} - 3,79 \cdot S_{\max \text{ в марте Байкит}}) + 4,89 \cdot \text{Sum}X_{(10-3) \text{ Ванавара}}$ <p>где:</p> <p>$S_{\max \text{ Муторай}}$ – максимальный за зиму запас воды в снеге на М Муторай, мм;</p> <p>$S_{31.III \text{ Муторай}}$ – запас воды в снеге на 31.03 на М Муторай, мм;</p> <p>$S_{10.04 \text{ Байкит}}$ – запас воды в снеге на 10.04 на М Байкит, мм;</p> <p>$S_{\max \text{ в марте Байкит}}$ – максимальный в марте запас воды в снеге на М Байкит, мм;</p> <p>$\text{Sum}X_{(10-3) \text{ Ванавара}}$ – сумма осадков с октября по март на М Ванавара.</p>
ΔН	<p>Комплексный показатель пропускной способности русла в конце зимы</p> $\Delta H = (14,1 \cdot (H_{31.03 \text{ Кузьмовка}} - H_{\min \text{ в марте Кузьмовка}}) - 16,5 \cdot (H_{10.04 \text{ Кузьмовка}} - H_{31.03 \text{ Кузьмовка}}) - 7,05 \cdot ((H_{10.04 \text{ Байкит}} - H_{31.03 \text{ Байкит}}) - (H_{31.03 \text{ Байкит}} - H_{20.03 \text{ Байкит}})))$ <p>где:</p> <p>$H_{31.03 \text{ Кузьмовка}}$ – уровень воды на 31.03 ГП Кузьмовка, см;</p> <p>$H_{\min \text{ в марте Кузьмовка}}$ – уровень воды минимальный в марте ГП Кузьмовка, см;</p> <p>$H_{10.04 \text{ Кузьмовка}}$ – уровень воды на 10.04 ГП Кузьмовка, см;</p> <p>$H_{31.03 \text{ Байкит}}$ – уровень воды на 31.03 ГП Байкит, см;</p> <p>$H_{10.04 \text{ Байкит}}$ – уровень воды на 10.04 ГП Байкит, см;</p> <p>$H_{20.03 \text{ Байкит}}$ – уровень воды на 20.03 ГП Байкит, см.</p>
Q	<p>Показатель осеннего увлажнения</p> <p>Q – средний месячный расход воды в августе предыдущего года на ГП Кузьмовка, м³/с</p>
D	<p>Показатель суровости начала зимы</p> <p>D – количество дней от 01.10 до даты установления ледостава на ГП Кузьмовка в предыдущем году.</p>

За три года оперативных испытаний в ФГБУ «Среднесибирское УГМС» в период 2012–2014 гг. и авторских испытаний на независимом материале в 2011 г. ошибка прогноза вышла за пределы допустимой величины только один раз в 2013 году (табл. 4). В 2012 году ошибка была на границе допустимого интервала. По мере накопления данных наблюдений подобные методики следует уточнять, пересчитывая коэффициенты уравнения.

Таблица 4

**Результаты прогноза максимального уровня воды весеннего половодья (см)
р. Подкаменная Тунгуска – факт. Кузьмовка по уравнению (1)
(допустимая ошибка 154 см)**

Год	N_{\max} Кузьмовка- (наблюденный)	Прогноз	Ошибка
2011	1500	1544	44
2012	1242	1393	151
2013	1402	1603	201
2014	1300	1271	–29

Оправдываемость по ранее используемой графической методике (по графикам связи со снегозапасами на метеостанциях бассейна) также оказалась равной 75 % (табл. 5).

Таблица 5

**Результаты прогноза максимального уровня воды весеннего половодья (см)
р. Подкаменная Тунгуска – факт. Кузьмовка по графической методике
(допустимая ошибка 154 см)**

Год	N_{\max} Кузьмовка- (наблюденный)	Прогноз	Ошибка
2011	1500	1350	–150
2012	1242	1350	108
2013	1402	1450	48
2014	1300	1530	230

Соответственно, разработанный метод прогноза при сравнении не обеспечивает более высокую оправдываемость прогноза. В то же

время результаты расчетов по двум методикам асинхронны, неоправдавшиеся прогнозы наблюдаются в разные годы. В таких ситуациях в оперативной деятельности предпочтение может быть отдано расчетам того метода, исходные данные которого будут лучше соответствовать складывающейся гидрометеорологической обстановке на водосборе. В данном случае отдать предпочтение одному из испытываемых методов затруднительно.

Рекомендации к внедрению

Учитывая результаты оперативных испытаний метода прогноза ежедневных уровней воды в период весеннего половодья в 2012–2014 гг., Технический совет Среднесибирского УГМС в своем решении от 20 ноября 2014 г. рекомендовал внедрить в отделе гидрологических прогнозов Гидрометцентра ФГБУ «Среднесибирское УГМС» метод прогноза максимальных уровней воды р. Подкаменная Тунгуска у факт. Кузьмовка в качестве вспомогательного расчетного метода.

Список литературы

1. Бураков Д.А. Математическая модель расчета гидрографа весеннего половодья для равнинных заболоченных бассейнов // Метеорология и гидрология. – 1978. – № 1. – С. 49–59.
2. Бураков Д.А., Авдеева Ю.В. Технология оперативных прогнозов ежедневных расходов (уровней) воды на основе спутниковой информации о заснеженности (на примере р. Нижней Тунгуски) // Метеорология и гидрология. – 1996. – № 10. – С. 75–87.
3. Бузин В.А. Методы прогнозов зазорных и заторных явлений // Труды V Всесоюзного гидрологического съезда. Том 7. – Л.: Гидрометеоиздат, 1989.
4. Лиссер И.Я. О зависимостях для прогноза максимальных заторных (ледоходных) уровней воды при вскрытии сибирских рек // Метеорология и гидрология. – 1981. – № 11. – С. 83–87.
5. Шуляковский Л.Г., Еремина В.А. К методике прогноза заторных уровней воды // Метеорология и гидрология. – 1952. – № 1. – С. 46–51.
6. Бураков Д.А., Космакова В.Ф. и др. Опыт разработки методов долгосрочного прогноза максимальных уровней воды на Сибирских реках // Труды VI Всероссийского гидрологического съезда. Том 3. Наводнения и другие опасные гидрологические явления: оценка, прогноз и смягчение негативных последствий. – СПб: Гидрометеоиздат, 2006. – 295 с.