

Автоматизированная технология мониторинга весеннего половодья на сибирских реках

Д.А. Бураков¹, В.Н. Копылов², В.Ю. Ромасько³, Е.В. Швецова⁴

¹*Средне-Сибирское территориальное управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды*

E-mail: bur@meteo.krasnoyarsk.ru

²*Югорский научно-исследовательский институт информационных технологий*

E-mail: kvn@uriit.ru

³*Сибирский филиал Всероссийского научно-исследовательского института по делам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций*

E-mail: victor@space.akadem.ru

⁴*Новосибирский государственный технический университет*

E-mail: alena@sibvaleo.com

Представлена информационная технология, основанная на математической модели формирования стока воды в бассейнах рек Оби и Енисея в период весеннего половодья. В бассейнах выделяются ландшафтно-гидрологические районы и высотные зоны. Физико-статистический водно-балансовый метод прогноза стока весеннего половодья опирается на уравнение водного баланса, записанного в форме уравнений стока для емкостного или инфильтрационно-емкостного типов поглощения воды бассейном. Модель усваивает данные метеорологических станций и гидрологических постов. Для оптимизации параметров снегонакопления и снеготаяния, а также для текущей корректировки прогноза притока воды в водохранилища и ежедневных уровней воды используются спутниковые данные. Разработана «Служба мониторинга заснеженности», которая обрабатывает спутниковые данные в автоматическом режиме. В рамках технологии создана база гетерогенных данных, включающая гидрометеорологические, атрибутивные и спутниковые данные о территории, расположенной в бассейнах рек Енисея, Оби, Иртыша.

Ключевые слова: Математическая модель формирования стока, уравнение водного баланса, гидрологический прогноз, снегонакопление, снеготаяние, спутниковые данные, классификация, радиометр MODIS.

Гидролого-математическая модель прогноза стока весеннего половодья

В основу прогноза характеристик весеннего половодья и притока воды в водохранилища в бассейнах рек Оби и Енисея положена концептуальная модель формирования стока сибирских рек, разработанная авторами [1-4]. Основные принципы построения модели:

- в бассейне выделяются ландшафтно-гидрологические районы и высотные зоны;
- в районах и высотных зонах пространственная неравномерность снегонакопления и емкостного поглощения учитываются с применением вероятностных распределений;
- русловое добегание воды рассчитывается с применением функции плотности вероятностного распределения времени добегания элементарных объемов воды и теоретических формул моментов распределения времени добегания.

Структурно модель состоит из блоков, выполняющих следующие функции:

- расчет снегонакопления по районам и высотным зонам бассейна;
- расчет снеготаяния и площади снегового покрытия;

- расчет водоотдачи бассейна от талых вод и жидких осадков с учетом поглощения и задержания воды;
- расчет динамического запаса воды на склонах и притока воды в русловую сеть;
- расчет руслового добега воды к замыкающему створу.

Модель усваивает как метеорологические параметры (снегонакопление, температуру воздуха, осадки), так и гидрологические (уровни или расходы воды в речной сети бассейна). Территориальное многообразие процессов стока учитывается путем выделения в бассейне ландшафтно-гидрологических районов [3, 5]. В горных условиях в каждом районе обязательно учитывается высотная поясность через выделение высотных зон. Ход температуры воздуха, снеготаяния и осадков рассчитываются по данным опорных станций с помощью соответствующих высотных градиентов для каждой высотной зоны. Неизвестные параметры в формулах отдельных блоков модели определяются сочетанием методов оптимизации и линейной регрессии [6].

Зависимость слоя весеннего стока y от подачи воды $S+x$ (S – запас воды в снежном покрове; x – осадки периода снеготаяния) при гиперболическом виде функции территориального распределения водоудерживающей емкости [7] выражается в виде

$$y = (1 - w)(S + x - P_{\max} \operatorname{th} \frac{S + x}{P_{\max}}),$$

где P_{\max} – водоудерживающая емкость бассейна (максимальные потери);

w – доля постоянно бессточной площади.

Водоудерживающая емкость бассейна изменяется по годам в зависимости от осеннего увлажнения. Если $S+x=0$, то $y=0$, т.е. весенний сток формируется только за счет поступления воды $S+x$. В действительности, по мере оттаивания весной верхнего слоя почв и грунтов на тех участках бассейна, в пределах которых «избыток» почвенного увлажнения U превышает емкостное задержание, слой U также принимает участие в формировании стока. С учетом этого

$$Y = (1 - w)[(S + x + U) - P_{\max} \times \operatorname{th}(\frac{S + x + U}{P_{\max}})], \quad (1)$$

где P_{\max} – максимальное значение водоудерживающей емкости для наиболее сухих предшествующих условий; U – приращение влагосодержания бассейна перед началом снеготаяния в конкретном году за счет осеннего увлажнения и возможного подтягивания влаги к фронту промерзания зимой.

В Сибири, вследствие преобладания суровых зим и ежегодно глубокого промерзания почв, U можно рассматривать как функцию только показателя осеннего увлажнения m : $U = c + d \lg(m + 1)$,

где c и d – коэффициенты, которые нами определяются для каждой реки (или нескольких рек в однородных условиях ландшафта) методами оптимизации.

В рассматриваемой модели водоудерживающая емкость бассейна включает как задержание в микропонижениях, так и свободную почвенно-грунтовую емкость. Параметр P_{\max} , характеризующий водоудерживающую емкость бассейнов в годы наиболее низкого предшествующего увлажнения, в степной и лесостепной зоне Сибири составляет около 190 – 220 мм. Эти значения принимаются за теоретический верхний предел P_{\max} для равнин и платообразных возвышенностей Сибири.

В основе подмодели поверхностной составляющей склонового притока в русловую сеть $q(t)$ лежит концепция динамического (гравитационного) запаса воды $W(t)$ на склонах, связанного с $q(t)$ в общем случае нелинейно [1-3]:

$$W(t+1) = W(t) + v(t) - q(t), \quad v(t) = (h - Z - I) \varphi(t), \quad q(t) = \alpha \{0,5[W(t) + W(t+1)]\}^n$$

где t – время;

$v(t)$ – суточная водоотдача бассейна [6];

$\varphi(t)$ – относительная действующая площадь, в пределах которой происходит пополнение

динамического запаса воды (изменяется от нуля в состоянии высыхания бассейна, до $(I-\omega)$ при насыщении почвы водой);

h - слой подачи дождевой (талой) воды за расчётный интервал;

Z - испарение (задается по средним многолетним данным, либо по известной формуле);

I - впитывание, связанное с пополнением базисного стока и определяемое по расходу воды Q_{min} в конце кривой истощения ($I = 86.4Q_{min}/F$, мм/сут);

α - коэффициент, учитывающий гидравлические условия и другие факторы;

n - показатель степени.

В период снеготаяния водоотдача бассейна $v(t)$ определяется с применением формулы (1) по уравнению $v(t)=Y(t)-Y(t-I)$, в котором $H=S+x$ заменяется суммой $H=\sum(h-Z-I)_i$, рассчитываемой за период от начала снеготаяния до соответствующих моментов времени t и $(t-I)$. Подача воды на склон h определяется для периода снеготаяния и выпадения дождя. Суточное таяние снега рассчитывается по средней суточной температуре воздуха Θ и коэффициентам снеготаяния K , которые назначаются различными для открытых и лесных территорий. Таяние в лесу рассчитывается по формуле $h_n = K_n \times \Theta$ (при $\Theta < 0^0$ $h_n=0$), а таяние в поле определяется как $h_n = K_n \times (\Theta + 2)$ (при $\Theta + 2 < 0^0$ $h_n=0$). Для оптимизации модельных блоков снегонакопления и снеготаяния используется спутниковая информация о динамике площади снеготаяния [8, 9].

Более детальная модель склонового притока основана на его представлении в виде суммы трех составляющих:

1) «динамичный», т.е. поверхностный, а также быстрый почвенно-грунтовый приток q ;

2) «медленный» (q_m) поверхностный почвенно-грунтовый приток, формирующий нижнюю часть гидрографа половодья (паводка);

3) «базисный», устойчивый приток, с постоянным расходом воды Q_{min} , на который выходит кривая истощения (спада). Опыт показал, что такой подход обеспечивает более высокую точность расчетов для небольших горных рек.

Русловая трансформация притока рассчитывается с помощью интеграла свертки

$$Q(t + \Delta t) = \left[\sum_{i=1}^n \int_0^{\Delta t} q_i(t + \Delta t - \tau) f_{q_i}(\tau) d\tau \right] + Q_w(t + \Delta t) + Q_{min},$$

где $Q(t + \Delta t)$ – расход воды в замыкающем створе;

t - дата выпуска прогноза;

Δt - заблаговременность прогноза;

n – число ландшафтно-гидрологических районов, на которые разбит речной бассейн;

$q_i(t)$ – суммарный приток в русловую сеть с i -ого района;

$f_{q_i}(\tau)$ – кривая добега бокового притока с i -ого района (функция влияния) [2,3];

$Q_w(t + \Delta t)$ – составляющая расхода воды, обусловленная истощением начального (на момент t) запаса воды в русловой сети;

Q_{min} – устойчивое (базисное) питание реки.

Выразив запас воды в русловой сети в зависимости от высот уровней воды $H_i(t)$ в пунктах наблюдений, получим следующее уравнение (вывод приведен в [3]):

$$H(t + \Delta t) = \left[c_0 \sum \int_0^{\Delta t} q_i(t + \Delta t - \tau) f_{q_i}(\tau) d\tau + \sum c_i (H_i(t) - H_{i \min})^{y1} + \sum c_{i+1} (H_i(t) - H_i(t-1))^{1/y2} + H_{\min} \right]$$

где H – прогнозируемый уровень воды в замыкающем створе;

$c_i, y1, y2$ - коэффициенты;

$H_{i \min}$ - минимальный уровень воды в i -м пункте речной системы, принятый за условный нуль отсчета;

H_{\min} – то же в замыкающем створе.

Оперативный мониторинг заснеженности бассейнов рек по спутниковым снимкам

Для оптимизации параметров блока снегонакопления и снеготаяния гидролого-математической модели, оценки снегонакопления и картирования нормы запаса воды в снеге в горах по ретроспективным данным, а также для текущей корректировки прогноза притока воды в водохранилища ГЭС и ежедневных уровней (расходов воды) в технологии используются спутниковые снимки радиометра MODIS, установленного на борту космического аппарата Terra. Процесс обработки спутниковых данных для определения площадей заснеженности речных бассейнов включает в себя ряд вычислительных процессов для подготовки данных, классификации, подсчёта площадей, вычисления композитов, подготовки обзорных изображений результатов, подсчёта статистики и т.п.

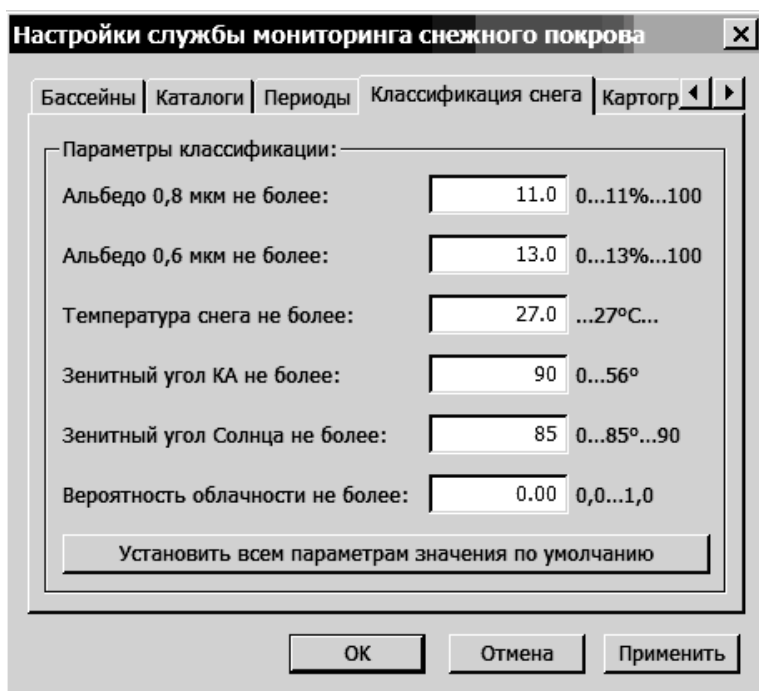


Рис. 1. Закладка «Классификация снега» диалога настройки параметров

помощью пакета программ IMAPP (International MODIS/AIRS Processing Package) версии 1.5 с открытым исходным кодом. Пакет IMAPP состоит из трёх программ, которые поочерёдно производят распаковку исходного потока данных, географическую привязку и радиометрическую калибровку.

Тематическая обработка производится также в автоматическом режиме. Для настройки службы предусмотрен пользовательский интерфейс в виде диалога настройки. Настройка службы заключается в задании или модификации значений ряда параметров для бассейнов рек, каталогов данных, периодов накопления данных, алгоритма классификации снега, модуля наложения картографической основы. Все настройки службы сведены в двухуровневую иерархию и представлены закладками первого уровня в окне диалога (рис.1) и элементами управления на этих закладках (второй уровень).

В условиях облачности служба генерирует композитную картину заснеженности речных бассейнов с периодом накопления композита до 16 суток. Анализ показал, что в среднем 35% данных на композите представлено последними сутками, 50% — двумя последними сутками, 95% — десятью последними сутками, а 99% — четырнадцатью сутками. В результате классификации снимков выделяется облачность, устойчивый и неустойчивый снежный покров,

Для автоматизации процесса был разработан пакет программ (ПП) «Служба мониторинга заснеженности».

Конечным результатом работы ПП является распределение относительной и абсолютной площади снега по высотным зонам в пределах речного бассейна. «Служба мониторинга заснеженности» является масштабируемым, многопоточным приложением, которое работает полностью автоматически, добавляет и обновляет информацию в течение 30 минут после приема данных, представляет результаты в виде изображений, отчетов и графиков, и обеспечивает доступ к ним через Интернет. На первом этапе обработки модуль конвертирования в формат Level-1B производит обработку данных с

бесснежные районы (рис. 2).

Для представления результатов мониторинга заснеженности, рассчитываемых автоматически на регулярной основе «Службой мониторинга заснеженности» разработана программа «Информационный сайт службы мониторинга заснеженности». Программа представляет заснеженность в табличном и графическом виде посредством удалённого доступа по протоколу HTTP через Интернет. Она обеспечивает просмотр нескольких видов информации для каждого бассейна в любой момент по специфической для данного вида шкале времени. Предоставляемая информация состоит из картосхем снежного покрова и облачности и табличной информации об относительных площадях заснеженности высотных зон, о высоте границы снежного покрова районов бассейнов.

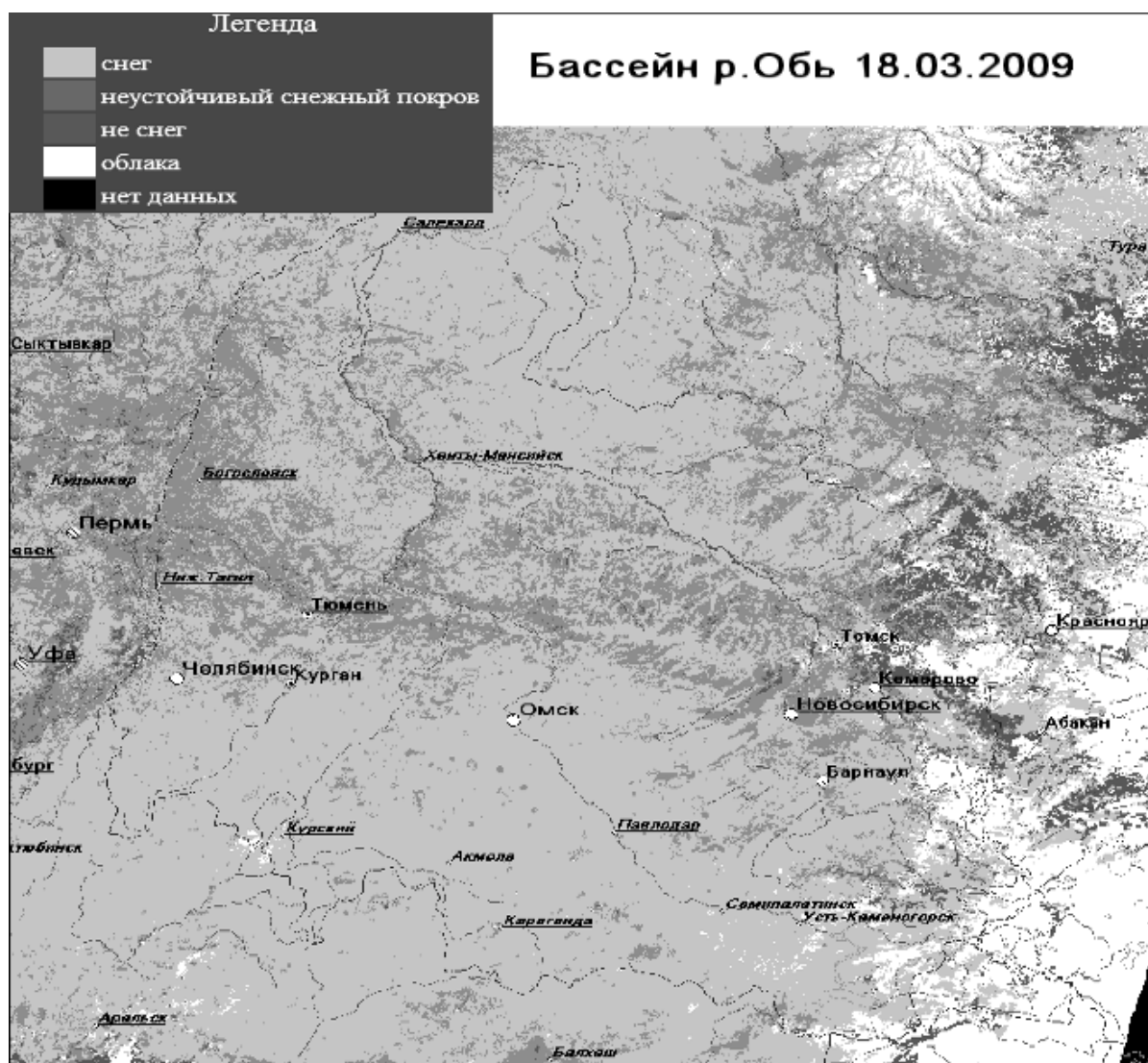


Рис. 2. Пример представления обзорного изображения 16-суточного композита (бассейн Оби 18.03.2009 г.)

Заклучение

Созданная информационная технология предусматривает оптимизацию параметров математической модели прогноза в ходе ее применения. Для этого используется электронная база многолетних гидрометеорологических данных наблюдений, обеспечивающая автоматизированный перебор и моделирование возможных гидрометеорологических ситуаций. База включает

ежедневные данные наблюдений десятков гидрологических постов и метеорологических станций за последние 19 лет. Были отобраны годы с непрерывными рядами гидрометеорологических наблюдений по большинству станций и постов, находящихся в бассейнах рек Енисея, Оби и Иртыша.

База данных информационной технологии также включает спутниковые данные, отличающиеся большими объемами и многомерностью, и атрибутивные данные, содержащие информацию о ландшафтно-гидрологических особенностях районов бассейнов рек.

Исходя из гетерогенности используемых данных, структура базы данных строилась на основе онтологического подхода. Онтологический подход обеспечивает стандартизацию, полноту и расширяемость представления накапливаемых данных. Структуры базы наблюдаемых данных, построенная на основе онтологии предметной области, предоставляет возможность многократного использования данных различными модулями и приложениями.

Практическое использование технологии показало хорошее качество прогнозов ежедневных и максимальных уровней воды на реках Сибири и притока воды в водохранилища Енисейских и Обской ГЭС при заблаговременности прогноза от 1 до 7 суток. Дальнейшая работа по усовершенствованию методики и технологии должна включать накопление и обобщение опыта прогноза декадного, месячного и квартального притока в процессе практического использования модели с применением различных способов задания метеорологической информации за период заблаговременности прогнозов (по данным года-аналога, выбираемого с учетом долгосрочных прогнозов погоды по методам ГМЦ России, Института Арктики, Красноярского ГМЦ и др.)

Рассмотренная методика одобрена Центральной методической комиссией Федеральной службы России по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, а информационная технология внедрена в оперативную практику отделов гидрологических прогнозов Западно-Сибирского (Новосибирск), Средне-Сибирского (Красноярск) и внедряется в Обь-Иртышском (Омск) территориальном управлении по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды [3, 8, 9]. Технология может быть адаптирована к другим рекам России.

Литература

- 1.Бураков Д.А. Кривые добегания и расчет гидрографа весеннего половодья // Томск: Томский госуниверситет, 1978. 129 с.
- 2.Бураков Д.А. Математическая модель расчета гидрографа весеннего половодья для равнинных заболоченных бассейнов // Метеорология и гидрология, 1978. № 1. С.49–59.
- 3.Бураков Д.А., Авдеева Ю.В. Технология оперативных прогнозов ежедневных расходов (уровней) воды на основе спутниковой информации о заснеженности // Метеорология и гидрология, 1996. №10. С.75–87.
- 4.Бураков Д.А., Адамович А.А. Учет весенних заморозков в гидролого-математической модели прогноза наводнений в бассейне Енисея // Труды VII научной конференции «Современные методы математического моделирования природных и антропогенных катастроф». Красноярск, 2003, Т. 1. С.14–21.
- 5.Виноградов Ю.Б. Математическое моделирование процессов формирования стока // Л.: Гидрометеоиздат, 1988. 312 с.
- 6.Корень В.И. Математические модели гидрологических прогнозов // Л.: Гидрометеоиздат, 1991. 199 с.
- 7.Попов Е.Г. Вопросы теории и практики прогнозов речного стока // М.: Гидрометеоиздат, 1963. 256 с.
- 8.Бураков Д.А., Кашкин В.Б., Сухинин А.И. и др. Методика определения заснеженности речного бассейна по спутниковым данным для оперативных прогнозов стока // Метеорология и гидрология, 1996. № 8. С.100–109.
- 9.Копылов В.Н. Международный проект мониторинга паводковой обстановки в северных

территориях с использованием данных ДЗЗ // Материалы Международной конференции «Информационные технологии и обратные задачи рационального природопользования». Ханты-Мансийск: ГП «Полиграфист», 2005. С.181-184.

Automated technology of monitoring a spring high water on Siberian rivers

D.A. Burakov¹, V.N. Kopylov², V.Y. Romasko³, E.V. Shvetsova⁴

¹Middle-Siberian territorial department on hydrometeorology and monitoring of an environment, Krasnoyarsk

²Ugra research institute of information technologies, Khanty-Mansiysk

³Siberian branch of the All-Russia research institute on a civil defense and extreme situations, Krasnoyarsk

⁴Novosibirsk state technical university, Novosibirsk

The information technology based on mathematical model of drain formation process during a spring high water in pools of the rivers Ob and Yenisei is submitted. The landscapes - hydrological areas and high-altitude zones were allocated in pools. The physics - statistical water - balance method of the drain forecast of a spring high water is based on the equation of the water balance which has been written down in the form of the drain equations for capacitor or for infiltration-capacitor types of water pool's absorption. The model acquires meteorological and hydrological data. The satellite information is used for optimization of snow accumulation and thawing parameters, and also for the current updating of the water inflow and daily water levels forecast. "Service of snow monitoring" is developed. It processes the satellite data in an automatic mode. Within the framework of technology the base of the heterogeneous data was created. It includes hydrological, meteorological, attribute and satellite data about territory located in pools of Yenisei, Ob and Irtysh rivers.

Keywords: Mathematical model of drain formation, equation of water balance, hydrological forecast, snow accumulation, snow thawing process, satellite data, classification, radiometer MODIS.