

Федеральная служба России по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды
Сибирский региональный научно-исследовательский гидрометеорологический институт
Среднесибирское и Западно-Сибирское УГМС

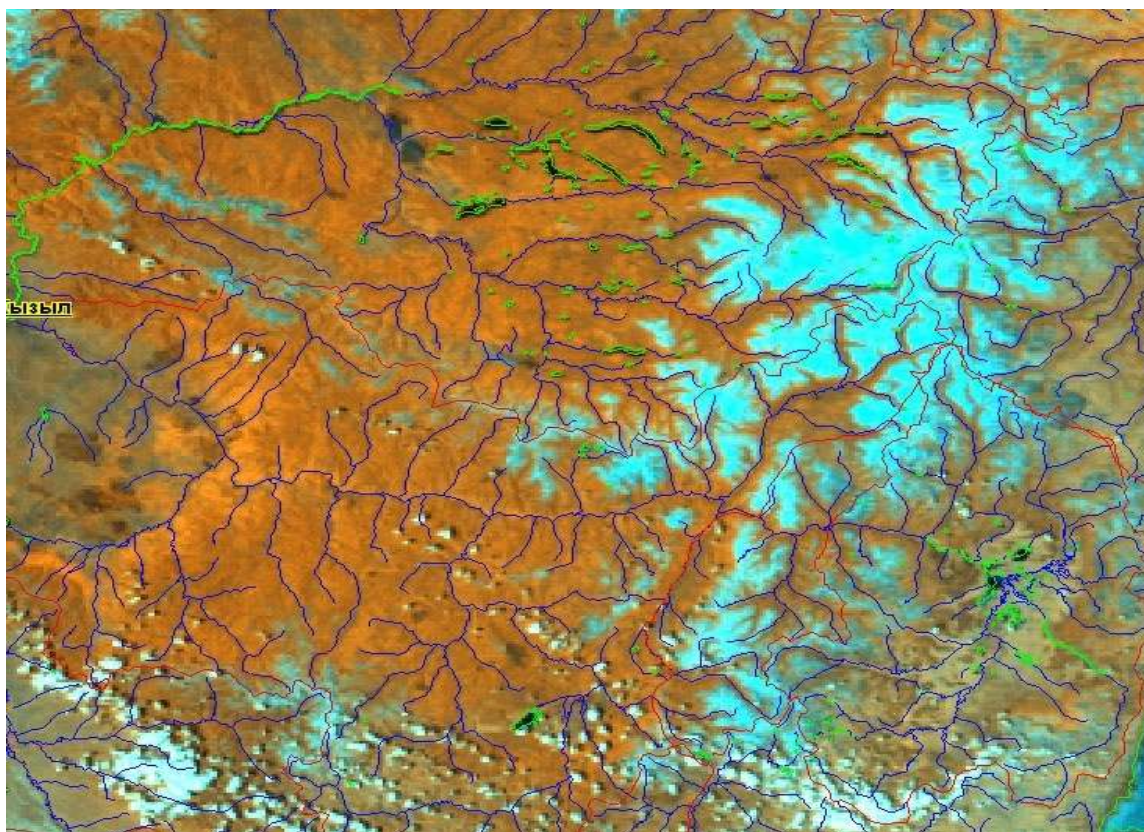
отчет

**Внедрить автоматизированные технологии прогноза притока воды
в водохранилища Сибирских ГЭС на основе наземной и спутниковой ин-
формации среднего разрешения. Разработать методики прогноза макси-
мальных уровней воды на затороопасных участках рек Сибири**

(тема 1.8.78 плана НИР и ОКР Росгидромета)

Ответственный исполнитель темы

Д.А. Бураков



Красноярск, 2007

Федеральная служба России по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды
Сибирский региональный научно-исследовательский гидрометеорологический институт
Среднесибирское и Западно-Сибирское УГМС

СОГЛАСОВАНО

Руководитель Среднесибирского УГМС
В.В. Еремин



« 15 » 01. 2008г.

УТВЕРЖДАЮ

Директор ГУ «СибНИГМИ»
д-р физ-мат. наук
В.Н. Круничатников
« 15 » 01. 2007г.



отчет

**Внедрить автоматизированные технологии прогноза притока воды
в водохранилища Сибирских ГЭС на основе наземной и спутниковой ин-
формации среднего разрешения. Разработать методики прогноза макси-
мальных уровней воды на затороопасных участках рек Сибири**

(тема 1.8.78 плана НИР и ОКР Росгидромета)

Ответственный исполнитель темы

Д.А. Бураков

Красноярск, 2007

УДК 556.536.164

РЕФЕРАТ

Д.А.Бураков, В.Ю. Ромасько, В.Ф Космакова и др.

Внедрить автоматизированные технологии прогноза притока воды в водохранилища Сибирских ГЭС на основе наземной и спутниковой информации среднего разрешения. Разработать методики прогноза максимальных уровней воды на затороопасных участках рек Сибири

Алгоритмы и программное обеспечение прогноза притока воды в водохранилища Обской и Енисейских ГЭС и автоматического мониторинга снежного покрова. Результаты мониторинга динамики заснеженности в 2007 г (бассейны Верхней Оби и Верхнего Енисея). Физико-статистическая модель долгосрочного прогноза максимальных уровней воды на затороопасных участках рек Томи, Енисея и Тасеевой.

Ключевые слова:

Гидрологические прогнозы, нижний бьеф, русловая сеть, речная система, расход воды, пуски ГЭС, время добегания, кривая добегания, гидролого-математическая модель формирования стока, кромка ледостава, подвижка льда, полынья, ледовый режим.

ОСНОВНЫЕ ИСПОЛНИТЕЛИ

1. Бураков Дмитрий Анатольевич, дгн, профессор, ответственный исполнитель от Среднесибирского УГМС	Научное руководство, разработка метода прогноза, математическая модель стока, разработка программного обеспечения прогноза, оптимизация параметров моделей, численные эксперименты, автор глав 1,3,4, соавтор 5 главы.
2. Богданова Валентина Федоровна, ответственный исполнитель от Западно-Сибирского УГМС	Подготовка электронного архива данных по бассейну Верхней Оби.
3. Ромасько Виктор Юрьевич	Автор главы 2. Прием и обработка информации со спутников Терра и НОАА, программное обеспечение для автоматического мониторинга снежного покрова.
4. Космакова Вера Фатеевна	Разработка корреляционных зависимостей для прогноза максимальных уровней воды, включая заторные.
5. Ковшова Елизавета Петровна	
6. Гордеев Иван Николаевич	Гидрологические расчеты, подготовка электронного архива данных, оптимизация параметров моделей, оценка оправдываемости прогнозов.
7. Холод Свентлана Андреевна\	
8. Иванова Ольга Игоревна	

Оглавление

стр

Введение	5
Глава 1. Усовершенствованный алгоритм модели формирования стока, реализующий прогноз ежедневных уровней (расходов) воды с использованием информации спутников «Terra».....	6
1.1. Общие положения	6
1.2 Исходная модель 1995-2000 г	7
1.3 Усовершенствованный алгоритм модели прогноза.....	10
Глава 2 Оценка динамики снегового покрытия по данным	23
2.1 Обзор существующих систем картирования снежного покрова по спутниковым данным	23
2.2 Программный пакет «Snow»	26
2.3 Исследование алгоритмов классификации данных MODIS.....	54
2.4. Совершенствование «Службы мониторинга заснеженности».....	65
2.5. Динамика заснеженности районов и высотных зон бассейнов Обского, Красноярского и Саяно-Шушенского водохранилищ в 2004—2006 гг.	73
Литература к главе 2.....	85
Глава 3. Бассейн водохранилища Обской ГЭС	88
3.1. Ландшафтно-гидрологическая характеристика бассейна.....	88
3.3. Оптимизация параметров модели прогноза притока воды в водохранилище Обской ГЭС (вариант «Обь– 2007»)	99
Глава 4. Уточнение параметров прогностической модели притока воды в водохранилища Енисейских ГЭС.....	108
4.1 Прогноз притока в водохранилище Саяно-Шушенской ГЭС.....	108
4.2 Прогноз бокового притока в водохранилище Красноярской ГЭС.....	115
4.3. Оценка точности прогнозов притока воды в водохранилища Енисейских ГЭС.....	118
Глава 5. Долгосрочный прогноз максимальных уровней воды с учетом возможных заторов льда (реки Томь - Томск, Енисей - Назимово, Енисей - Ярцево).....	125
Заключение.....	134
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ (главы 1, 3, 4, 5).....	137

ВВЕДЕНИЕ

Примерно 30 лет назад в Гидрометцентре СССР и в Сибирских УГМС разработана методика прогноза притока воды в водохранилища Сибирских ГЭС (А.А. Харшан, 1975). В этих целях предложено использовать линейную зависимость $Q_{пр} = a \cdot S + b$, в которой S - показатель снегонакопления в речном бассейне, определяемый с привлечением данных осадкомеров; “ a ” и “ b ” - эмпирические коэффициенты [24,25]. Таким образом, главной концепцией методической базы гидрологических прогнозов в бассейне Верхней Оби было положение о том, что первопричина высокого или низкого стока рек за второй квартал определяется запасами воды в снеге, накопившимися к началу снеготаяния. Вся проблема в основном сводилась к тому, как правильно оценить запас воды в снежном покрове на обширной территории, слабо освещённой гидрометеорологическими наблюдениями. Для решения этой проблемы в Сибирских УГМС выполнены большие работы по организации снегомерных съёмок. Получили развитие авиационные гамма съёмки, специальные наземные маршруты и речные наблюдения в горах с вертолёта.

Однако по мере накопления данных многолетних наблюдений выяснилось, что не всегда только запас воды в снеге определяет прогнозируемый приток. Например, в 1995 году снегозапас был практически равен многолетней норме, однако приток воды в водохранилища Сибирских ГЭС оказался достаточно высоким, а для Красноярской ГЭС - на одном из первых мест в убывающем ряду наблюдений (выше был только приток за 1966 год). Противоположный случай – исключительно высокий запас воды в снеге и не соответствующий ему приток, демонстрирует пример половодья в 1997 году. Выполненные в 1995-1997 гг исследования показали, что весенний сток Сибирских рек и приток воды в водохранилища ГЭС, зависит не только от накопленного за зиму запаса воды в снеге, но и в значительной степени от особенностей весенней погоды, количества весенних осадков, типа весны.

Наиболее полно учитывают комплекс влияющих факторов концептуальные модели процесса формирования стока (гидролого-математические модели). Автоматизированные технологии на базе таких моделей и должны быть положены в основу прогнозов стока весеннего половодья и притока воды в водохранилища. В Сибири концептуальная модель формирования стока разработана в 1965-2000 гг. Начиная с 1998-1999 г она стала использоваться на практике.

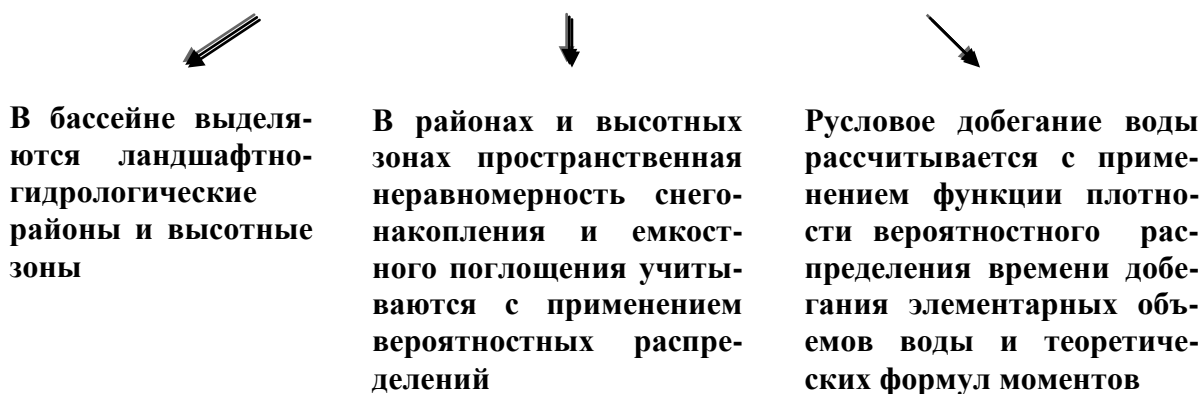
Глава 1. Усовершенствованный алгоритм модели формирования стока, реализующий прогноз ежедневных уровней (расходов) воды с использованием информации спутников «Терра»

1.1. Общие положения

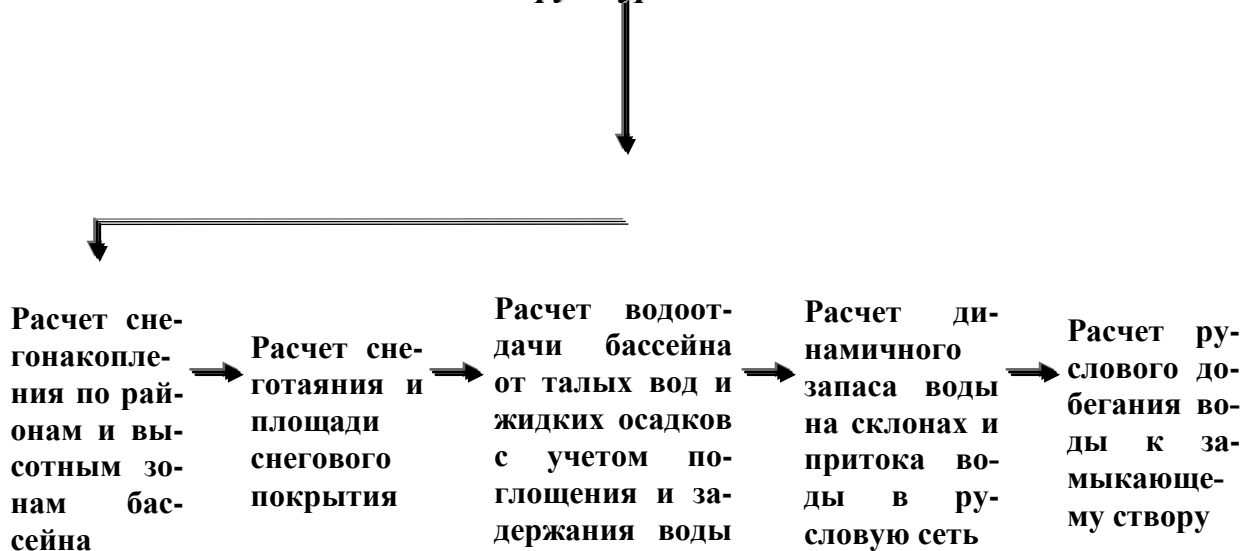
Рассмотрим сначала принципы построения и структуру варианта модели 1995-2000 гг, а затем перейдем к характеристике усовершенствованных блоков этой модели.

На следующих ниже схемах характеризуются принципы построения и структура модели.

Принципы построения модели:



Структура модели



В горах южной Сибири существующая сеть наблюдений за снегонакоплением крайне ограничена. Пункты наблюдений располагаются в относительно засушливых речных долинах. В зонах высокой снежности регулярные наблюдения не проводятся. Особенно это относится к бассейну водохранилища Саяно-Шушенской ГЭС. Для оценки запасов снега мы используем подход Э.М. Ольдекопа, согласно которому допускается существование постоянного соотношения между суммами осадков, выпавших за одинаковые календарные периоды на нижних и верхних высотных уровнях бассейна. Данные наиболее репрезентативных пунктов наблюдений мы используем для оценки относительных (в долях многолетней нормы) характеристик снегонакопления (модульных коэффициентов). Переход от относительных к абсолютным значениям запасов снега (мм) осуществляется умножением соответствующих модульных коэффициентов на многолетние средние запасы воды в районах и высотных зонах. Последние определяются на основе обобщения существующей информации, научных публикаций (например, «Атлас снежно-ледниковых ресурсов мира», разработанный ведущими специалистами под методическим руководством Института географии РАН), а также с использованием спутниковой информации на основе анализа высотной динамики сезонных снеговых границ (метод «теплого проявления»).

1.2 Исходная модель 1995-2000 г

Ниже представлена краткая информация о рассматриваемой модели

В процессе разработки моделей стока сибирских рек, ориентированных на применение в гидрологических прогнозах, необходимо учитывать крайне ограниченное информационное гидрометеорологическое обеспечение. С другой стороны, реальные условия формирования стока, в силу их многообразия, невозможно описать без использования тех или иных нередко весьма грубых допущений. В этих условиях на практике получили развитие модели, оперирующие с некоторыми осредненными по территории укрупненными показателями. Рассматриваемый «макроенетический» подход (по терминологии А.В. Огиевского) подготовлен современным состоянием развития гидрологии. Специфика, своеобразие приемов и методов классической гидрологии паводков отражает свойственные им массовые пространственно-временные закономерности, суммирование которых приводит к действию закона больших чисел, когда особенности развития каждого элементарного явления, взаимно компенсируясь, в итоге приводят к существованию устойчивых, достаточно простых закономерностей в развитии результирующего явления. Эти закономерности экономно описываются с помощью созданных классической гидрологией понятий, отражающих в укрупненном, обобщающем виде реально протекающие природные процессы. Вся история развития количественной гидрологии паводка представляет, по существу, разработку макроенетического подхода для описания этого яв-

ния. Осознание этого факта и попытка его научного обобщения принадлежат А.В. Огиевскому, М.А. Великанову, Г.П. Калинину, Е.Г. Попову, В.Д. Комарову и другим гидрологам. Их исследования явились основой развития современных методов прогноза снегового половодья и дождевых паводков [4, 5, 10, 13, 15, 16, 17.– список литературы к главам 1, 3, 4, приводится в конце отчета].

Для реализации рассматриваемой модели прогноза используются как метеорологические параметры (снегонакопление, температура 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. В горных условиях в каждом районе учитывается высотная поясность через выделение высотных зон.

В основе подмодели динамичной составляющей склонового притока в русловую сеть $q(t)$ лежит концепция динамичного (гравитационного) запаса воды $W(t)$ на склонах, связанного с $q(t)$ в общем случае не линейно [3,4,5]:

$$W(t+1) = W(t) + \varphi(t) (h - Z - I)_{t+1} - q(t+1), \quad (1.1)$$

$$q(t) = \alpha \left[0.50 W(t+1) + W(t) \right]^{-p} \quad (1.2)$$

где t - время; $\varphi(t)$ - относительная действующая площадь, в пределах которой происходит пополнение динамичного запаса воды (изменяется от нуля в состоянии высыхания бассейна, до $(1-\omega)$ при насыщении почвы водой); ω - доля постоянно бессточной площади в бассейне; h - слой подачи дождевой (талой) воды за расчётный интервал; Z - испарение; I - впитывание, связанное с пополнением базисного стока и определяемое по расходу воды Q_{\min} в конце кривой истощения ($I = 86.4 Q_{\min} / F$, мм/сут); α - переменный коэффициент, учитывающий гидравлические условия и другие факторы; p - показатель степени (в первом приближении $p=1$); F - площадь водосбора.

В период поступления воды на водосбор $\varphi(t)$ определяется по емкостной модели водопоглощения Е.Г. Попова [19]. Параметр поглощения талых вод (максимальные потери) определяется по эмпирической зависимости от косвенных показателей предшествующего увлажнения бассейна. Ход испарения задается по средним многолетним данным, либо по одной из известных расчетных формул. В период истощения склонового стока, когда $(h - Z - I)_t < 0$, учитывается процесс снижения действующей площади $\varphi(t)$ по мере истощения запасов воды на склоне.

Более детальная модель склонового притока основана на его представлении в виде суммы трех составляющих («трехобъемная трансформация»): 1) «динамичный», т.е. поверхностный, а также быстрый почвенно-грунтовый приток; 2) «медленный» поверхностный и почвенно-грунтовый приток, формирующий нижнюю часть гидрографа половодья (паводка); 3) «базис-

ный», устойчивый приток, с постоянным расходом воды Q_{\min} , на который выходит кривая истощения (спада).

Русловая трансформация склонового притока рассчитывается с помощью интеграла свертки

$$Q(t + \Delta t) = \left[\sum_{i=1}^n \int_0^{\Delta t} q_i(t + \Delta t - \tau) f_{q_i}(\tau) d\tau \right] + Q_w(t + \Delta t) + Q_{\min}, \quad (1.3)$$

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 добегания бокового притока с i -ого района (функция влияния), рассматриваемая как плотность распределения времени добегания элементарных объемов воды в гидрологической системе [2,3,9]; $Q_w(t + \Delta t)$ – 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 речной системы, получим следующее уравнение [5]:

$$H(t + \Delta t) = \left[c_0 \sum_{i=1}^n \int_0^{\Delta t} q_i(t + \Delta t - \tau) f_{q_i}(\tau) d\tau + \sum c_i (H_i(t) - H_{i\min})^{y_1} + \sum c_{i+n} (H_i(t) - H_i(t-1)) \right]^{1/y_2} + H_{\min}, \quad (1.4)$$

где: H – прогнозируемый уровень воды в замыкающем створе; c_i , y_1 , y_2 – коэффициенты; $H_{i\min}$ – минимальный уровень воды в i -том пункте речной системы, принятый за условный нуль отсчета; H_{\min} – то же в замыкающем створе. Параметры, входящие в формулы отдельных блоков модели, определяются сочетанием методов оптимизации и линейной регрессии.

Спутниковая информация о распределении площади снегового покрытия бассейна по высотным зонам используется для оптимизации параметров модели и для текущей коррекции прогнозов [5,8]. В горно-лесных районах, где и зимой и весной в период снеготаяния на снимках видны участки тёмнохвойной тайги, изображение снега относится только к открытым высокогорным ландшафтам, сухим степям и разреженным лиственным лесам. Для оценки площади, занятой тёмнохвойными лесами, использовались спутниковые изображения территории, полученные перед началом снеготаяния (данные НОАА). В программном обеспечении, реализующем математическую модель стока, расчёт снеготаяния по высотным зонам проводится отдельно для открытой и лесной территории. Таким образом, расчёты по модели дают возможность оценить динамику площадей снегового покрытия для открытых пространств (в районах и высотных зонах) и сопоставить её со спутниковыми данными. В результате дальнейшего анализа проводится корректировка параметров блоков модели, в которых ведётся расчёт снегонакопления и снеготаяния.

1.3 Усовершенствованный алгоритм модели прогноза

Дальнейшее совершенствование элементов алгоритма модели преследовало следующие цели:

1. Обеспечить возможность корректировки параметров снегонакопления и снеготаяния в интерактивном режиме с целью достижения совпадения «модельной» и «космической» заснеженности с учетом специфики представления информации ИСЗ «Terra».
2. Учесть в модельных расчетах изменение заснеженности вследствие выпадения твердых осадков и формирования временных снежных покровов весной.
3. Учесть на базе имеющейся ограниченной информации формирование водоотдачи и склонового стока с учетом оттаивания сезонной мерзлоты и замерзания-таяния почвенного льда при весенних заморозках.

Рассмотрим последовательно все перечисленные вопросы.

Корректировка параметров снегонакопления и снеготаяния в интерактивном режиме с целью достижения совпадения «модельной» и «космической» заснеженности

С весны 2004 г в Красноярске установлено оборудование для приема информации спутника TERRA в новом канале (1,6 мкм), где снежный покров имеет очень низкую отражательную способность. Согласно выполненным исследованиям (см. главу 2), использование для территории Горного Алтая и Саян комбинации каналов 1,6 мкм и видимого диапазона в виде так называемого *NDSI*-индекса (Нормализованный Дифференциальный Снеговой Индекс) позволяет в подавляющем большинстве случаев эффективно отличать снег от прочих объектов на снимке, в том числе и от облачности. Чувствительность критерия на основе *NDSI* столь высока, что зимние кроны деревьев не являются непреодолимым препятствием для классификации снежного покрова в лесу. Незначительная модификация алгоритма для лесных районов позволяет повысить долю правильно классифицированного снега в лесу до 90 – 98 % (глава 2). Если при использовании данных ИСЗ NOAA нами сопоставлялись значения площади снегового покрытия только на безлесных территориях, то при использовании информации ИСЗ TERRA появляется возможность сопоставления заснеженности как по безлесным территориям, так и лесным (кроме очень густых темнохвойных участков леса).

С этой целью в программном обеспечении предусмотрена выдача соответствующих данных (таблица 1.1).

Пример выдачи информации о заснеженности районов и высотных зон
(в процентах) в бассейне водохранилища Саяно-Шушенской ГЭС

Заснеженность в районе	Средняя высота высотной зоны (м)	480	762	1067	1372	1677	1982	2286	2591	2896	3200
	Заснеженность высотных зон										
54/76	Район 1	0/0	0/0	17/44	62/96	79/100	94/100	97/100			
60/71	Район 2		0/0	0/3	38/57	70/90	88/98	94/99	98/100	99/100	
45/53	Район 3		0/0	0/0	0/11	38/58	76/86	91/96	97/99	99/100	
66/81	Район 4				0/0	29/38	64/84	78/98	90/100	95/100	98/100

В поле таблицы 1.1 в числителе по результатам модельных расчетов приводится заснеженность (площадь снегового покрытия, %) на открытой местности, в знаменателе – то же для всей территории районов и высотных зон. Эта информация используется в процессе оптимизации тех параметров модели, которые влияют на распределение снегонакопления и ход снеготаяния. Если оценки заснеженности по данным космической информации заметно отличаются от расчетных, то производится соответствующая корректировка параметров.

Учет изменения заснеженности при выпадении твердых осадков и образовании временных снежных покровов в период снеготаяния

Выше упоминалось, что учет неравномерности залегания снега в расчетах снеготаяния производится по методу А.Г. Ковзеля, предложившего использовать для этой цели кривую распределения запасов воды в снежном покрове. В результате удается учесть территориальную неравномерность снеготаяния, приводящую к неодновременному сходу снега на участках с различным снегонакоплением. Метод позволяет учесть появление проталин и нарастание в ходе снеготаяния их суммарной площади от нуля до 100 %. Расчеты этим методом выполняются отдельно для открытых и лесных участков в пределах высотной зоны.

В период снеготаяния нередко выпадают твердые осадки, что приводит к образованию временных снежных покровов. При этом заснеженность бассейна увеличивается до 100 %, пока временный снежный покров не растает. Космические изображения бассейна фиксируют этот процесс. Для моделирования динамики заснеженности и хода снеготаяния разработан следующий подход.

Предполагается, что весенние твердые осадки выпадают равномерным слоем в пределах высотной зоны бассейна. Осадки считаются твердыми, если средняя суточная температура воздуха оказывается ниже заданного порогового значения (например, $+2^{\circ}\text{C}$). Временный снежный покров образуется при условии, что количество выпавших твердых осадков превышает слой стаивания. Пока это условие выполняется, площадь снегового покрытия в пределах высотной зоны составляет 100 %. В момент стаивания выпавшего слоя твердых осадков заснеженность становится равной той величине, которая наблюдалась до появления временного снежного покрова. Расчет выполняется отдельно для лесных и открытых участков высотной зоны. Суммируя площади покрытых снегом участков, получаем заснеженность районов и всего бассейна в заданный момент времени.

Реализацию изложенного подхода покажем на примере бассейна р. Абакан, который является составной частью площади водосбора бокового притока в водохранилище Красноярской ГЭС (район «Абакан»). Рассматривается первая высотная зона со средней высотой 255 м (табл. 1.2).

В данном примере временные снежные покровы образовались в трех случаях: 12 апреля, 19 апреля и 1-2 мая. В этих случаях температура воздуха была либо отрицательной, либо положительной, но она не достигала порогового значения. Например, двенадцатого апреля при температуре воздуха $-0,84^{\circ}\text{C}$ выпало 8,5 мм твердых осадков, при этом заснеженность возросла с 61 до 100 %. 13 апреля при температуре $+3,56^{\circ}\text{C}$ заснеженность снизилась до 60 %. Аналогичная ситуация наблюдалась и в остальных случаях.

Учет динамики заснеженности при образовании временных снежных покровов обеспечивает возможность сопоставления модельной и космической информации о заснеженности территории.

Таблица 1.2

Ход осадков (X), температуры воздуха (t) и заснеженности (F_{сн}, %) (район «Абакан», высота 255 м)

Год	Мес.	X	t	F _{сн} , %	Год	Мес.	X	t	F _{сн} , %
	Дата					Дата			
2004	4 1	0.0	-0.04	100	2004	4 18	0.0	2.76	43
2004	4 2	0.0	4.56	99	2004	4 19	4.3	0.36	100
2004	4 3	0.0	3.66	96	2004	4 20	0.4	2.66	43
2004	4 4	0.0	-0.14	93	2004	4 21	0.0	4.66	41
2004	4 5	0.0	0.26	93	2004	4 22	0.0	5.76	39
2004	4 6	0.0	3.96	88	2004	4 23	0.0	5.46	37
2004	4 7	0.8	4.36	80	2004	4 24	0.0	7.26	33

2004	4	8	0.2	2.66	73	2004	4	25	5.1	9.36	29
2004	4	9	0.2	4.26	66	2004	4	26	0.4	8.46	23
2004	4	10	0.0	-0.64	61	2004	4	27	1.3	1.86	20
2004	4	11	0.0	-3.54	61	2004	4	28	0.1	-0.34	40
2004	4	12	8.5	-0.84	100	2004	4	29	0.8	2.56	19
2004	4	13	8.7	3.56	60	2004	4	30	1.3	5.06	17
2004	4	14	9.1	2.36	57	2004	5	1	0.2	-2.34	100
2004	4	15	16.8	3.06	53	2004	5	2	4.4	-0.14	100
2004	4	16	3.2	5.66	47	2004	5	3	0.0	8.96	14
2004	4	17	0.0	2.36	44	2004	5	4	0.0	16.76	9
						2004	5	5	0.6	15.06	3

Учет осеннего увлажнения и оттаивания почвы в моделях прогноза стока весеннего половодья на Сибирских реках

Суровый сибирский климат приводит к глубокому сезонному промерзанию почв. Согласно И.Л. Калюжному и К.К. Павловой [11], в лесах и на болотах из-за высокой пористости верхних слоев почвы и мохового покрова явление образования запирающих слоев в период инфильтрации талой воды в мерзлые почвы – явление достаточно редкое. Подтягивание влаги к фронту промерзания зимой и образование запирающих слоев в период снеготаяния характерно для степных и лесостепных районов, лесотундры и тундры. Согласно В.Д. Комарову, если глубина промерзания ежегодно превышает 0.5-0.6 м, изменчивость потерь стока вследствие варьирования промерзания почв по годам практически не выражена. В Сибири глубина промерзания почвы практически ежегодно превышает указанные пределы. По этой причине степень льдистости почвы в конце зимы в основном определяется уровнем ее осеннего увлажнения.

Согласно нашим исследованиям [3 и др.], параметр потерь P_{\max} , характеризующий водоудерживающую емкость бассейнов в годы наиболее низкого предшествующего увлажнения, в степной и лесостепной зоне Сибири составляет 190 - 220 мм. Эти значения примем за теоретический верхний предел P_{\max} . В горных районах, как показали балансовые расчеты, параметр потерь P_{\max} может существенно увеличиваться.

В результате выпадения летне-осенних дождей и миграции влаги в зимний период к фронту промерзания, слой воды, заполняющий почвенно-грунтовую емкость, может увеличиться на некоторую величину U . Тогда уравнение для прогноза слоя талого стока Y при гиперболическом виде функции территориального распределения водоудерживающей емкости [19] получит вид

$$Y = (1 - w)[(S + x + U) - P_{\max} \operatorname{th}\left(\frac{S + x + U}{P_{\max}}\right)], \quad (1.5)$$

$$U = c + d \lg(m + 1) \quad (1.6)$$

где S – запас воды в снежном покрове перед началом снеготаяния; x – осадки периода снеготаяния; w – коэффициент, учитывающий долю постоянно бессточной площади; m – показатель осеннего увлажнения; P_{\max} , c и d – коэффициенты, которые нами определяются для каждой реки или нескольких рек в однородных условиях ландшафта методами оптимизации [3]. Слой воды U участвует в формировании стока по мере оттаивания верхнего слоя почв и грунтов на тех участках бассейна, в пределах которых «избыток» осеннего увлажнения превышает емкостное задержание. Подчеркнем, что в Сибири глубина промерзания почв превышает 1 м, поэтому осенняя почвенная влага до начала снеготаяния почти полностью находится в замерзшем состоянии (за вычетом некоторой доли прочносвязанной не замерзшей воды).

Из (1.5) следует, что в том случае, если сумма $S + x$ равна нулю, сток зависит от U :

$$Y(U) = (1 - w)[U - P_{\max} \operatorname{th}\left(\frac{U}{P_{\max}}\right)]. \quad (1.7)$$

Расчеты показывают, что при P_{\max} 190 мм слой начального заполнения водоудерживающей емкости U в зависимости от величины осеннего увлажнения изменяется по территории и от года к году от 0 до 150-190 мм, причем наибольших значений U достигает в северной тайге, лесотундре и тундре. Наибольшей изменчивостью слоя U по годам отличаются заболоченные бассейны южной тайги и лесостепи Западно-Сибирской равнины. Так, для почти сплошь заболоченного бассейна р. Иксы - с. Плотниково U изменяется от 20-30 мм при низком до 140-150 мм при наиболее высоком осеннем увлажнении. Для р. Пур - пос. Самбург (лесотундра и тундра), где ежегодно обеспечивается предельно высокое осеннее увлажнение, слой начального заполнения водоудерживающей емкости U практически не изменяется по годам (192 мм). Согласно формуле (1.7), сток $Y(U)$, формирующийся за счет поступления воды от таяния почвенно-грунтового льда, изменяется от 0 до 25 мм в зависимости от изменений U .

Расчет водоотдачи бассейна (склона) за счет оттаивания мерзлой почвы

Рассмотрим схему расчета водоотдачи бассейна по формулам 1.5–1.7. Полагаем, что таяние почвенного льда начинается с момента схода снега, с появлением проталин. Расчет суточного таяния почвенного льда (h) осуществляется по выражению, вытекающему из формулы

Стефана $h=K_{пт}\sqrt{\sum \Theta}$, где $K_{пт}$ – коэффициент стаивания почвенного льда (оценка его значений будет дана ниже).

Суммарное количество воды U , поступающее за счет таяния почвенного льда, определяется в зависимости от осеннего увлажнения (формула 1.6). Суточная водоотдача бассейна $v(t)$ определяется на основе формулы (1.7):

$$v(t) = Y(U - \sum_0^{t-1} h_i) - Y(U - \sum_0^t h_i), \quad (1.8)$$

где $\sum_0^{t-1} h_i$ и $\sum_0^t h_i$ – интегральный слой воды, образующийся при таянии почвенного льда за период от начала таяния до моментов $t-1$ и t соответственно. Расчет таяния почвенного льда продолжается до тех пор, пока $(U - \sum_0^{t-1} h_i) > 0$.

Расчет притока в русловую сеть в период снеготаяния с учетом похолоданий

Процесс формирования стока при неустойчивой весенней погоде носит прерывистый характер. Во время потеплений, в ходе снеготаяния, талая вода насыщает поры снега, и ее избыток поступает на поверхность почвы. В периоды похолоданий при отрицательной температуре воздуха снеготаяние прекращается, вода, содержащаяся в порах снега, замерзает, лужи и ручьи на свободных от снега участках покрываются льдом, а оттаявшая с поверхности почва начинает повторно промерзать. Попытка учета в моделях талого стока фазовых превращений воды при похолоданиях предпринята в работах В.И. Корня, Ю.Б. Виноградова, Л.С. Кучмента и др. [13,10,16]. Она основана на гидрофизическом расчете динамики почвенной влаги в зоне аэрации и фазовых превращений воды в снежном покрове и почве. Эти исследования развивают теоретические аспекты математического моделирования процессов формирования стока. Однако отсутствие многих необходимых для их реализации гидрофизических характеристик почвы, достаточно обоснованный и надежный учет изменчивости которых для реальных водосборов затруднен, не позволяет получить желаемый для практики результат. Действительно, водно- и теплофизические характеристики почв в конечном итоге вынужденно усредняются по площади, что не согласуется с их значительной территориальной изменчивостью. Для условий Сибири, где информационное обеспечение гидрологических прогнозов крайне ограничено, остается актуальной необходимость дальнейшей разработки этих вопросов.

В рассмотренной нами модели используется понятие динамического запаса воды на склонах (W , формула 1.1). Этот запас определяется на основе балансовых уравнений, отдельно для периода формирования водоподачи на поверхность бассейна и для периода истощения запаса во-

ды на склонах. Суточный приток воды в русловую сеть $q(t)$ определяется по формуле 1.2 в зависимости от величины динамического запаса воды:

$$q(t) = \alpha \{0,5[W(t) + W(t+1)]\}^p$$

где t - время; α - переменный коэффициент, учитывающий гидравлические условия и другие факторы; p - показатель степени, который для средних и крупных рек может задаваться равным единице.

Как показано в [12,1,4], одним из факторов, определяющих сопротивление движению воды на склонах, является снежный покров. По этой причине в начальный период снеготаяния значительная часть образовавшегося на поверхности склонов динамического запаса воды скапливается под снегом и не поступает в русловую сеть. В [3,4] коэффициент α в формуле (1.2) в период снеготаяния предлагается определять по следующей эмпирической зависимости:

$$\alpha(t) = \alpha_0 \exp\left[\frac{-\beta S_{o(t-1)}}{W_{t-1} + 1}\right] \quad (1.9)$$

где: α_0 - максимальное значения α (при отсутствии снежного покрова); $S_{o(t-1)}$ – оставшийся снеготаяния запас на склонах; β - коэффициент, учитывающий эффект снижения скоростей склонового стока вследствие сопротивления снежного покрова.

В период похолоданий, для учета снижения склонового стока вследствие замерзания талой воды и увеличения гидравлических сопротивлений из-за образования ледяных пробок, используется эмпирическая формула

$$\alpha(t+1) = \alpha(t) / (1 + \zeta / \theta^\circ), \quad (1.10)$$

где: θ° - абсолютное значение величины среднесуточной температуры воздуха; ζ - коэффициент [3,4].

Заметим, что в моделях [10,13,16] игнорируется учет переменных гидравлических условий стока воды в период снеготаяния в связи с исключительной сложностью физико-математического анализа и недостаточной экспериментальной изученностью этого явления. Пока остается единственный путь его описания при помощи концептуальных зависимостей, например, подобных (1.9) и (1.10).

Таким образом, в прежнем варианте рассматриваемой модели [1,2] учет заморозков осуществляется, во-первых, через расчет снеготаяния, которое прекращается при отрицательных температурах, и, во-вторых, при помощи коэффициента α . При этом не учитывается в достаточной степени тот факт, что при похолоданиях происходит замерзание определенной части талой воды, содержащейся в снежном покрове, в лужах и ручьях, а также в зоне аэрации почвогрунтов. Рассмотрим этот вопрос.

Пусть в период похолодания накопилась сумма отрицательных температур воздуха $\sum -\Theta^0$. и при этом произошло замерзание воды в снежном покрове, на освободившейся от снега почве и образование льда в лужах и ручьях. Определим, какая сумма положительных температур потребуется для таяния замерзшей воды. С этой целью воспользуемся зависимостями, рассмотрение которых содержится в [11,13 и др.]. Для оценки количества замерзшей воды используются подход Стефана, в котором толщина слоя промерзания пропорциональна $\sqrt{\sum |-\Theta^0|}$. Для оценки таяния почвы А.В. Павлов и В.И. Корень используют аналогичный вид зависимости. Таяние снега, как известно, пропорционально сумме накопившихся положительных температур воздуха. Таяние льда, определяемое по методике С.Н. Булатова, зависит от прихода тепла к верхней и нижней поверхности, величина которого также приближенно пропорциональна сумме положительных температур. Как показали расчеты по схемам Павлова и Корня, при одинаковых параметрах почвы (влажность скелета почвы, плотность, количество прочносвязанной влаги, факторы теплопроводности) для промерзания и оттаивания одного и того же слоя почвы требуется примерно одинаковая по абсолютной величине сумма температур, т.е.

$$(\sum + \Theta^0)_{почва} = (\sum |-\Theta^0|)_{почва} \quad (1.11)$$

Коэффициенты замерзания и оттаивания воды по нашим расчетам примерно равны $10-14 \frac{\text{мм слоя воды}}{\sqrt{^0\text{C} \times \text{сут}}}$ (этот вопрос рассмотрен ниже).

Количество замерзшей воды в снеге пропорционально $\sqrt{\sum |-\Theta^0|}$. Следовательно, учитывая, что таяние снега пропорционально сумме положительных температур в первой степени, а также, согласно [16] и выполненным нами расчетам, коэффициенты снеготаяния и замерзания для снежного покрова примерно равны, получим, что искомая сумма положительных температур определяется по формуле

$$(\sum + \Theta^0)_{снег} = (\sqrt{\sum |-\Theta^0|})_{снег} \quad (1.12)$$

Например, если при очередном похолодании накопилась сумма отрицательных температур, равная -25 градусов, то для оттаивания замерзшей в порах снега воды потребуется сумма положительных температур воздуха примерно $+5$ градусов.

При таянии льда, согласно выполненным расчетам по способу С.Н. Булатова, рассматриваемые суммы температур также связаны приближенной зависимостью:

$$(\sum + \Theta^0)_{лед} = (\sqrt{\sum |-\Theta^0|})_{лед}, \quad (1.13)$$

Полученные соотношения позволяют предложить следующую схему учета весенних заморозков в моделях формирования талого стока. Пусть процесс снеготаяния прерывается похолоданием с суммой отрицательных температур воздуха $\sum -\Theta^0$. При этом талая вода, содержащаяся в порах снега, а также формирующая динамичный запас воды на склонах, полностью или частично замерзнет. Определим с использованием зависимостей (1.11)-(1.13) суммы положительных температур, которые потребуется для оттаивания воды, замерзшей во время похолодания. После окончания заморозка, в тот момент времени, когда накопится указанная сумма положительных температур, изъятый на замерзание объем воды восстановится. Следовательно, количество талой воды, которое образуется за период времени между моментами окончания похолодания и накопления $\sum +\Theta^0$ (назовем этот период «восстановительным»), расходуется на восполнение объема воды, временно изъятого на ледообразование.

Отсюда вытекает следующий алгоритм приближенных расчетов. После окончания заморозка расчет снеготаяния прекращается до окончания восстановительного периода, пока не накопится $\sum +\Theta^0$. При этом расчет склонового притока по формулам 1.1–1.2 продолжается непрерывно как во время похолодания, так и в течение восстановительного периода. В формуле (1.2) зависимость (1.9) для коэффициента $\alpha(t)$ уточняется следующим образом:

1) для периода похолодания

$$\alpha(t) = \frac{\alpha(t-1)}{1 + \zeta \sum_{t_n}^t |-\Theta|}, \quad (1.14)$$

2) для восстановительного периода

$$\alpha(t) = \frac{\alpha(t-1)}{1 + c \left[\sum_{t_n}^{t_{on}} |-\Theta| - \sum_{t_{on}}^t +\Theta \right]}, \quad (1.15)$$

где t_n — момент начала похолодания; t_{on} — момент окончания похолодания; ζ — коэффициент, который может уточняться с применением методов оптимизации.

В период сплошного залегания снежно-ледяного покрова (площадь снегового покрытия превышает 50%), $\sum +\Theta^0$ определяется по формуле (1.12). В том случае, если окажется, что

$k_c \sum +\Theta \geq \varepsilon H$, принимаем $\sum +\Theta^0 = \frac{\varepsilon H}{k_c}$, где k_c — коэффициент снеготаяния, ε — влажность

снега.

В последующий период (до полного схода снега) сумму положительных температур рекомендуется определять по формуле (1.11)

$$(\sum + \Theta^0) = (\sum - \Theta^0), \quad \text{Рас-}$$

смотренный алгоритм учета весенних заморозков включен в гидролого-математическую модель [1,2], что позволило повысить обоснованность и точность расчетов и прогнозов ежедневных расходов (уровней) воды, особенно для небольших рек, наиболее «чувствительных» к изменению температуры воздуха при неустойчивой весенней погоде.

Оценка коэффициентов таяния (промерзания) почвы, снега и льда

А.В. Павлов и В.И. Корень, развивая подход Стефана, разработали методику расчета промерзания (оттаивания) почв и грунтов [13]. Выполненные нами с участием А.А. Адамовича [6] численные эксперименты с использованием зависимостей А.В. Павлова и В.И. Корня позволили получить значения коэффициентов промерзания ($K_{\text{пп}}$) и таяния ($K_{\text{пт}}$) в приближенных формулах

$$h_{\text{пн}} = K_{\text{пн}} \sqrt{\sum | -t |}, \quad h_{\text{пм}} = K_{\text{пм}} \sqrt{\sum t} \quad (1.16)$$

где $h_{\text{пн}}$, $h_{\text{пм}}$ – соответственно слой замерзшей или оттаявшей воды в почве, $\sqrt{\sum | -t |}$, $\sqrt{\sum t}$ – суммы отрицательной (положительной) средней суточной температуры воздуха за период промерзания (таяния) почвы.

Расчеты выполнялись для трех типов почв, условно разделенных на легкие ($\rho=1200 \text{ кг/м}^3$), средние ($\rho=1400 \text{ кг/м}^3$), тяжелые ($\rho=1600 \text{ кг/м}^3$), с влажностью 10, 20 и 35 % и соответствующим значениям коэффициентов теплопроводности и объемной теплоемкости талых и мерзлых почв. В расчетах учитывалось количество прочно связанной незамерзающей влаги.

Численные эксперименты показали, что глубина промерзания (оттаивания) практически не изменяется в зависимости от типа почвы при одинаковом увлажнении для легких и средних почв, причем $K_{\text{пп}}$ и $K_{\text{пт}}$ близки по величине. Для тяжелых почв глубина промерзания увеличивается от легких к тяжелым почвам, но не очень существенно. Основная причина изменчивости рассматриваемых коэффициентов – степень влажности почвы. Обобщенные результаты оценки коэффициентов промерзания ($K_{\text{пн}}$) и оттаивания ($K_{\text{пм}}$) приведены в табл. 1.3.

Коэффициенты промерзания ($K_{пт}$) и оттаивания ($K_{пт}$)
почв и грунтов

Уровень увлажненности пород	Влажность, %	Коэффициент промерзания-оттаивания мм/ $\sqrt{^{\circ}C}$ в сут
Сухие	10	4
средние	20	9
влажные	35	14

В связи с тем, что повторное промерзание (оттаивание) почвы происходит при среднем и высоком ее увлажнении, коэффициенты промерзания и оттаивания в этих условиях примерно равны $10-14 \frac{\text{мм слоя воды}}{\sqrt{^{\circ}C} \times \text{сут}}$.

Для определения коэффициентов **промерзания - оттаивания льда** выполнены аналогичные расчеты с применением известного метода С.Н. Булатова, эмпирических формул, отражающих связь толщины льда с накопленной суммой температур для условий Сибири, а также по эмпирическим формулам, основанным на формуле Стефана (Бефани, Калинин, 1983, «Упражнения и разработки по гидрологическим прогнозам»). Цель этих расчетов – обоснование коэффициентов стаивания $K_{лн}$ и промерзания $K_{лн}$ льда в формулах (1.17):

$$h_{лн} = K_{лн} \sum t, \quad h_{лн} = K_{лн} \sqrt{\sum |t|}. \quad (1.17)$$

Численные эксперименты дали следующие результаты: коэффициент стаивания льда составляет 5–8 мм/град.сут, а коэффициент замерзания 5–6 $\frac{\text{мм слоя воды}}{\sqrt{^{\circ}C} \times \text{сут}}$.

Коэффициенты стаивания снега $K_{сн}$ давно применяются на практике для расчетов снеготаяния по формуле $h_{сн} = K_{сн} \sum t$. Многие авторы принимают его значение для открытой местности равным 5 мм/град.сут.

Л.С. Кучмент [16] предлагает расчет суточного слоя замерзшей воды в снеге производить по формулам

$$h_{сн} = \begin{cases} S' = K_{сн} \sqrt{|t|}, & t < 0, & S' < \rho_6 \Theta_c H, \\ \rho_6 \Theta_c H, & t < 0, & S' \geq \rho_6 \Theta_c H, \\ 0, & t \geq 0, & \Theta_c = 0 \end{cases} \quad (1.18)$$

где $h_{сн}$ – интенсивность замерзания талой воды в снеге при похолоданиях; $K_{сн}$ – коэффициент замерзания, принимается равным коэффициенту стаивания; Θ_c – объемная влажность снега; ρ_6 –

плотность воды. Коэффициент замерзания снега Л.С. Кучмент принимает равным коэффициенту стаивания.

Для проверки предположения о равенстве коэффициентов замерзания и оттаивания был произведен расчет глубины промерзания по формуле В.И. Корня и получены коэффициенты $K_{ст}$ и $K_{сн}$. После замены в этой формуле коэффициента теплопроводности почвы на теплопроводность снега, а также влажности почвы на влажность снега, формула оказалась применимой для расчета промерзания снега. Она получила следующий вид:

$$Z(T + \Delta T) = \sqrt{\frac{Z(T)^2 + 2\lambda_c / t / \Delta T}{\rho_s L_l V_c}} \quad (1.19)$$

где $\lambda_c = 1,373 \cdot 10^{2,25 \cdot \rho_{сн}}$;

T – время;

$Z(T)$ – глубина промерзания снега, см;

λ_c - теплопроводность снега, Дж/(см*ч*гр)

t – среднесуточная температура воздуха

V_c – объемная влажность снега, в долях единицы

L_l – удельная теплота ледообразования Дж

ρ_v – плотность воды, кг/м³

ρ_c – плотность снега, кг/м³

Расчеты с применением формулы (1.19) дали среднее значение коэффициента промерзания $K_{сн}$ равным 5 мм/√⁰С·сут. Следовательно, для снега коэффициент промерзания можно принять равным значению коэффициента стаивания для открытой местности.

Усовершенствованный алгоритм склоновой трансформации

Подмодель склонового притока в русловую сеть $q(t)$ основывается на концепции динамического (гравитационного) запаса воды $W(t)$ на склонах (см. раздел 1.2), связанного с $q(t)$ в общем случае не линейно:

$$W(t+1) = W(t) + (h - Z - I)_t \varphi(t) - q(t), \quad (1.20)$$

$$q(t) = \alpha [W(t)]^n, \quad (1.21)$$

где t - время; $\varphi(t)$ - относительная действующая площадь, в пределах которой происходит пополнение динамического запаса воды (изменяется от нуля в состоянии высыхания бассейна, до $(1-\omega)$ при насыщении почвы водой); ω - доля постоянно бессточной площади в бассейне; h - слой подачи дождевой (талой) воды за расчётный интервал; Z - испарение; I - впитывание, связанное с пополнением базисного стока и принимаемое равным расходу воды в конце кривой

истощения (спада); α - переменный коэффициент, учитывающий гидравлические условия и другие факторы; n - показатель степени.

В случае представления суточной величины притока как линейной ($n=1$) функции динамического среднесуточного запаса воды на склонах, уравнение (1.21) представляется как:

$$q(t+1) = \alpha [(W(t) + W(t+1)) / 2], \quad (1.22)$$

. Подставляя последнее уравнение в (1.20), получим:

$$W(t+1) = W(t) [(2 - \alpha) / (2 + \alpha)] + \Delta W(t+1) [2 / (2 + \alpha)]. \quad (1.23)$$

Формула (1.23) позволяет вести расчет ежедневных величин запаса воды на склонах, зная которые, можно, в свою очередь, определить и величины притока воды со склонов в русловую сеть по формуле (1.22). Начальное значение $W(t)$ в первый день снеготаяния задается равным нулю. Именно такой алгоритм используется в расчетах по варианту модели 1999 года.

Более общей является используемая нелинейная модель:

$$W(t+1) = W(t) + (h - Z - I) \varphi(t) - q(t), \quad (1.24)$$

$$q(t) = \alpha [0,5 (W(t) + W(t-1))]^n. \quad (1.25)$$

Решение данной системы уравнений выполняется методом итераций (последовательных приближений). Опыт вычислений показал, что приемлемое по точности приближение получается при 5–8 итерациях. Очевидно, задавая показатель степени $n=1$, данная схема расчета адекватна линейной. В общем случае величина показателя степени n определяется способом оптимизации. Рассмотренный алгоритм ниже использован в моделях прогноза притока воды в водохранилища Енисейских и Обской ГЭС.

Глава 2 Оценка динамики снегового покрытия по спутниковым данным

2.1 Обзор существующих систем картирования снежного покрова по спутниковым данным

Системы картирования снежного покрова по спутниковым данным в США

Космические аппараты являются хорошим инструментом для картирования снежного покрова, потому что высокое значение альбедо снега хорошо контрастирует с большинством других естественных покровов земной поверхности. Уже на первых снимках со спутника *TIROS-1*, последовавших после запуска в апреле 1960 г был зарегистрирован снежный покров [19, – список литературы к главе 2 приводится в конце главы]. Но только к середине 1960-х гг. снег начали успешно картировать еженедельно, с запуском КА *ESSA-3*. Космический аппарат *ESSA-3* нес Улучшенную Камеру на основе Видикона (*Advanced Vidicon Camera System, AVCS*), работающую в диапазоне 0,5—0,75 мкм с пространственным разрешением в надире 3,7 км. С 1966 г

NOAA картирует снежный покров северного полушария еженедельно на основе данных ряда приборов, таких как: Сканирующий Радиометр (*Scanning Radiometer, SR*), Радиометр Очень Высокого Разрешения (*Very High Resolution Radiometer, VHRR*), Улучшенный Радиометр Очень Высокого Разрешения (*Advanced Very High Resolution Radiometer, AVHRR*) (*Matson et al.*, 1986; *Matson*, 1991).

Первоначально еженедельный продукт Национальной Системы Спутниковых Данных и Информации об Окружающей среде NOAA (*National Environmental Satellite Data and Information System, NESDIS*) определялся на основе изображений в видимом диапазоне с полярных и геостационарных спутников Земли и наземных данных. Анализ проводился один раз в неделю, причём использовался один самый свежий чистый снимок земной поверхности. В тех местах, где облака мешали аналитику разглядеть наземный покров, брались данные предыдущей недели (*Ramsay*, 1998). Карты рисовались вручную, а затем оцифровывались с использованием сетки размером 89x89 ячеек, наложенной на карту северного полушария в стереографической проекции. С 1997 г еженедельный продукт заменён новым продуктом Интерактивной Системы Картирования Снега и Льда (*Interactive Snow and Ice Mapping System, IMS*). Продукт *IMS* представляет собой ежедневные карты снежного покрова с пространственным разрешением 25 км, строящиеся на основе информации в видимом, ближнем ИК и микроволновом диапазонах, а также данных метеостанций (*Ramsay*, 1998 и 2000).

По данным 22 лет наблюдений NOAA/NESDIS максимум средней многолетней площади снежного покрова северного полушария наблюдается в феврале и составляет 46,2 млн. км². В работе (*Robinson et al.* 1993) показано, что площадь снежного покрова северного полушария имеет среднее многолетнее стандартное отклонение средней месячной площади до 3 млн. км², а средней годовой — около 1,1 млн. км². Там же показано, что относительная ошибка среднемесячной площади снежного покрова северного полушария составляет от 4 до 25%. (Существует определённые сезонные отклонения, с максимумом ошибки в летние месяцы и минимумом в зимние.)

Региональные продукты снежного покрова с разрешением в 1 км оперативно готовятся для 3000—4000 речных бассейнов Северной Америки Национальной Службой Погоды (*National Weather Service*) на основе данных из Национального Оперативного Гидрологического Центра Дистанционного Зондирования NOAA (*National Operational Hydrologic Remote Sensing Center, NOHRSC*) (*Carroll*, 1990 и *Rango*, 1993). Датчики микроволнового диапазона на спутниках *Nimbus 5*, *6* и *7* и КА Оборонной Метеорологической Спутниковой Программы (*Defense Meteorological Satellite Program, DMSP*) успешно используются для измерения площади снежного покрова с разрешением от 25 до 30 км сквозь облака и в тёмное время суток с 1978 г (*Chang et al.*, 1987). Микроволновые датчики также дают информацию о глобальной толщине снежного по-

крова (*Foster et al.*, 1984). В настоящее время для этого используются данные *NOAA/AVHRR* и Микроволнового Сканера со Специальным Датчиком *DMSP (Special Sensor Microwave Imager, SSM/T)*. Многоканальный Сканер (*Multispectral Scanner, MSS*) и Тематический Картограф (*Thematic Mapper, TM*) КА *Landsat* с разрешением 80 и 30 м, соответственно, могут использоваться для оценки площади снежного покрова в пределах речных бассейнов (*Rango и Martinec*, 1982).

В рамках программы Системы Наблюдения Земли (*Earth Observation System, EOS*) был разработан и применяется с 1998 г алгоритм картирования снега и льда (включая ледовый покров больших озёр), альбедо снега, ледового покрова морей и его температуры на основе данных Спектрорадиометра Среднего Разрешения (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS*) (АТБД 10). Ежедневные и 8-дневные карты снежного покрова, а также ежедневные и 8-дневные композиты ледового покрова и температуры льда морей в виде цифровых растровых картографических продуктов выпускаются Системой Производства Продуктов (*Product Generation System, PGS*) Системы Данных и Информации *EOS (Earth Observation System Data Information System, EOSDIS)*. Все данные о снежном и ледовом покрове архивируются и распространяются Национальным Центром Данных о Снеге и Льде (*National Snow and Ice Data Center, NSIDC*) Центра Распределённого Действующего Архива (*Distributed Active Archive Center, DAAC*) в Университете Колорадо.

Этот алгоритм состоит из серии тестов и решающих правил, которые распознают наличие снега или льда в каждом пикселе изображения сканера *MODIS*. Алгоритм производит глобальный набор данных о снежном покрове суши и ледовом покрове больших озёр с разрешением 500 м, а для ледового покрова морей — с разрешением 1 км. Температура поверхности льда морей картируется с разрешением 1 км в дневное и ночное время суток. Кроме ежедневных карт делаются 8-дневные композиты всех продуктов.

Карты снежного покрова по данным *MODIS* дополняют ценные архивы снежного покрова северного полушария, начатые в 1966 г *NOAA* в виде еженедельного и продолжаемые сегодня в виде ежедневного продукта. Многочисленные спектральные каналы и выдающееся пространственное разрешение данных радиометра *MODIS* по сравнению с *AVHRR* придают значительное преимущество алгоритмам на их основе. Карты снежного покрова по данным *MODIS* — это шаг вперёд по сравнению картами *NOAA*, поскольку они имеют разрешение 500 м (25 км в случае *NOAA*) и отделяют снег от большей части облаков, а также представляют кроме ежедневных данных 8-дневные композиты. К тому же, алгоритм на основе *MODIS* полностью автоматический и, таким образом, уменьшает или исключает влияние субъективности. Также рассчитывается статистика о постоянстве и продолжительности снежного покрова.

С запуском спутника *Aqua*, имеющем на борту Улучшенный Микроволновой Сканирующий Радиометр (*Advanced Microwave Scanner Radiometer, AMSR*), стало возможным разработать

и реализовать алгоритм, использующий данные MODIS и AMSR, который позволит картировать не только площади залегания, но также и толщину снежного покрова, причём независимо от наличия облачности или времени суток.

Особенности картирования снежного покрова для прогноза параметров весеннего половодья

Для прогноза расходов (уровней) воды в реках в период весеннего половодья результаты картирования снежного покрова используются в виде относительных площадей заснеженности районов и высотных зон речных бассейнов. В зависимости от задачи, на используемые спутниковые данные о заснеженности накладываются определенные требования по оперативности поступления информации. Как показано в работе [1], данные об относительных площадях заснеженности могут применяться в практике гидрологических прогнозов для различных целей.

Во-первых, спутниковая информация может использоваться для калибровки гидрологической модели. С ее помощью можно уточнить параметры функции высотного распределения снегозапасов, коэффициенты стаивания, градиенты температуры воздуха не только для всего бассейна, но и для его отдельных областей. Для этой цели нет необходимости иметь оперативную информацию, поскольку калибровка модели делается по данным прошлых лет, часто только при изменении самой модели или для нового речного бассейна. При этом точность данных имеет существенное значение. В этом случае можно применять архивные данные нескольких наиболее чистых (безоблачных) дней года в период снеготаяния.

Во-вторых, информация может широко использоваться для оценки динамики заснеженности с целью диагностики возможной реакции расходов (уровней) воды замыкающего створа на ожидаемое изменение погоды. В этом случае абсолютно необходима оперативная ежедневная информация, часто она должна быть в наличии к определённом часу дня — для корректировки гидрологического прогноза. Ситуация может развиваться очень быстро, в течение считанных дней практически весь снег в бассейне может растаять. Поэтому здесь важно иметь именно свежую информацию. Точность данных конечно желательна, но даже при наличии облачности лучше иметь хоть какую-то свежую информацию, чем никакой.

В третьих, информацию о динамике заснеженности можно использовать для текущей корректировки входных параметров гидрологической модели, таких как начальный (максимальный) запас воды в снежном покрове. Для этой цели желательна регулярность поступающей информации. Хорошо иметь данные о заснеженности каждый день, но и один раз в неделю тоже достаточно, в крайнем случае — раз в месяц. При этом важна точность информации, поэтому, например, можно выбирать ближайший самый чистый день.

Таким образом, к данным о площадях заснеженности для гидрологического прогнозирования предъявляются разные требования по оперативности поступления и точности информации при естественном общем стремлении к повышению этих качеств.

2.2 Программный пакет «Snow»

За период с 1995 г в НИЦ Среднесибирского УГМС была разработана и успешно используется программа “Snow” для определения площадей заснеженности речных бассейнов по данным сканера *AVHRR* со спутников *NOAA*. В процессе её развития она служила как опытным стендом для исследования различных методов классификации снежного покрова, так действующей системой, использующейся в практике гидрологических прогнозов. Она предназначена для выделения заснеженных участков на изображениях сканера *AVHRR* со спутников *NOAA*, полученных в формате сигнала *HRPT*, и подсчета относительных и абсолютных площадей заснеженности в пределах заданных бассейнов рек, отдельно по высотным зонам и по районам бассейна.

Программа обеспечивает полный цикл обработки данных от файла исходной информации в формате *HRPT* до файла результатов в текстовом виде и не требует других программ для работы, за исключением приемной подсистемы, естественно.

В качестве картографической основы речных бассейнов используется покрытия изолиний высот рельефа и границ районов в формате *Arc/INFO* версии 3.4.1.

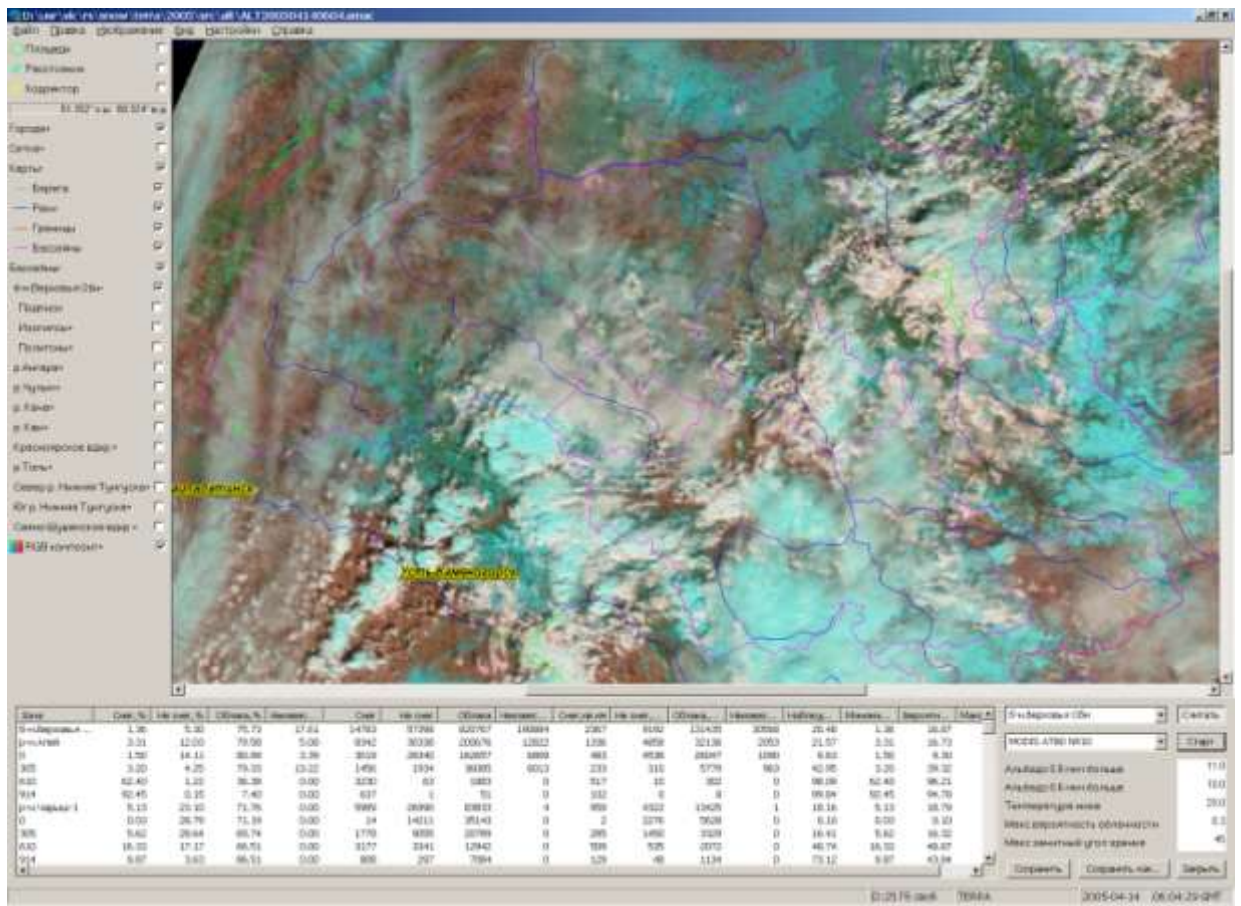


Рис. 2.1. Внешний вид программы «Snow».

В качестве основной идеи работы пользователя с данными дистанционного зондирования использовалась распространенная в ГИС модель *многослойной карты*. Данная модель подразумевает, что пользователь работает с данными как с картой, содержащей некоторый набор тематических слоев. Каждый набор связанных между собой по смыслу данных отображается отдельным слоем в иерархии слоев. Также, действия пользователя с данными представляют собой оперирование соответствующим слоем. Слои отображают свои данные в одном окне карты, имеющем определенную проекцию и масштаб (см. рис. 1.1). Масштаб соответствует текущему разрешению дисплея. Проекция карты определяется загруженным изображением. В отсутствие проекции в окне карты ничего отображено быть не может. Слои представлены в легенде карты, расположенной слева от окна карты.

Программа определения площадей заснеженности была разработана на основе базовой программы для просмотра изображений. Базовая программа по своим функциям весьма близка к обобщенному классу программ, предназначенных для просмотра изображений. По функциональному назначению в программе можно выделить основные операции — операции просмотра изображений, и специальные операции — операции тематической обработки спутниковой съемки. В основные операции входят:

- загрузка и сохранение файлов изображений,

- копирование изображения в буфер обмена,
- экспорт изображения в распространенные растровые форматы,
- настройка вида изображения,
- настройка масштаба,
- перемещение по изображению,
- отображение координат и значений в любой точке,
- наложение на изображение векторных цифровых географических карт,
- наложение на изображение градусной сетки.

К тематическим операциям отнесены следующие:

- фрагментация потока *HRPT*,
- коррекция географической привязки,
- классификация снежного покрова и определение площадей заснеженности.

Основной функцией базовой программы является показ изображений. Настройка изображения сводится к выбору композиции — определенного способа показа каналов изображения. Композиция может быть представлена как набором трех отображаемых каналов (по числу цветовых компонент) и способов их контрастирования (так называемый трехканальный композит), так и цельным алгоритмом преобразования любого числа каналов изображения в три цветовые компоненты. В программе существуют оба вида композиций.

В самом общем случае пользователь задает для каждой цветовой компоненты канал изображения и способ его контрастирования. Помимо каналов загруженного изображения можно использовать тематические каналы — такие, которые могут быть рассчитаны по исходным каналам сканеров, например, вегетационный индекс. Тематические каналы хранятся в памяти вместе с загруженными, но никогда не сохраняются. В программе реализованы три тематических канала:

- *NDVI* — нормализованный дифференциальный индекс растительности:
- Снег и лед — дифференциальный снежный индекс:
- *NDSI* — нормализованный дифференциальный индекс снега:

Нормализованный дифференциальный индекс растительности характеризует отражение в ближнем ИК диапазоне, в максимуме отражательной способности зеленых растений. Использование отношения исключает влияния разницы в освещенности, поскольку общий множитель сокращается, на что указывает слово «нормализованный» в названии.

Дифференциальный снежный индекс использует разницу в отражательной способности облаков и снега во втором канале *AVHRR*. За счет этой разницы индекс снега меньше, чем у облаков. Однако, высокие облака, состоящие из кристалликов льда, от снега не отличаются.

Нормализованный дифференциальный индекс снега использует еще большую разницу в отражательной способности облаков и снега в третьем «а» канале *AVHRR* (~1,6 мкм), устанавливаемом на спутниках, начиная с *NOAA-16*. Использование отношения (дроби) также исключает влияние разницы в освещенности, как и в *NDVI*. Высокие облака, состоящие из кристалликов льда, также от снега не отличаются, однако, доля таких облаков значительно меньше.

В программе реализовано четыре способа контрастирования:

- исходное — за яркость цветовой компоненты берется непосредственно значение канала;
- нормализация с гамма-коррекцией — диапазон значений канала растягивается на весь диапазон яркостей и затем производится гамма-коррекция;
- нормализация с насыщением — из диапазона значений канала вычитаются заданные доли минимальных и/или максимальных значений, а оставшийся диапазон растягивается на весь диапазон яркостей;
- эквализация — кумулятивная гистограмма значений канала линеаризуется, таким образом, выравнивая на изображении доли всех яркостей.

Также имеется возможность инверсии (негативного изображения).

Применяя различные каналы и способы контрастирования цветových компонент, пользователь выбирает желаемый вид изображения. Кроме того, можно воспользоваться несколькими predeterminedными композитами, подобранными для различных целей из опыта работы с данными дистанционного зондирования со спутников *NOAA*.

Графическая информация слоев отображается в окне программы в соответствии с выбранным масштабом карты. Это означает, что изображение на экране отображается в соответствующее число раз меньше оригинала. В программе можно либо выбрать predeterminedный масштаб от 1:25 000 до 1:10 000 000, либо уместить всё изображение в окне, либо показать изображение «пиксель-В-пиксель» дисплея. Диапазон ряда predeterminedных масштабов выбран с учетом разрешения на местности, обеспечиваемого сканером *AVHRR*. Выбранный фиксированный масштаб можно увеличивать или уменьшать степенями в $\sqrt{2}$ раз.

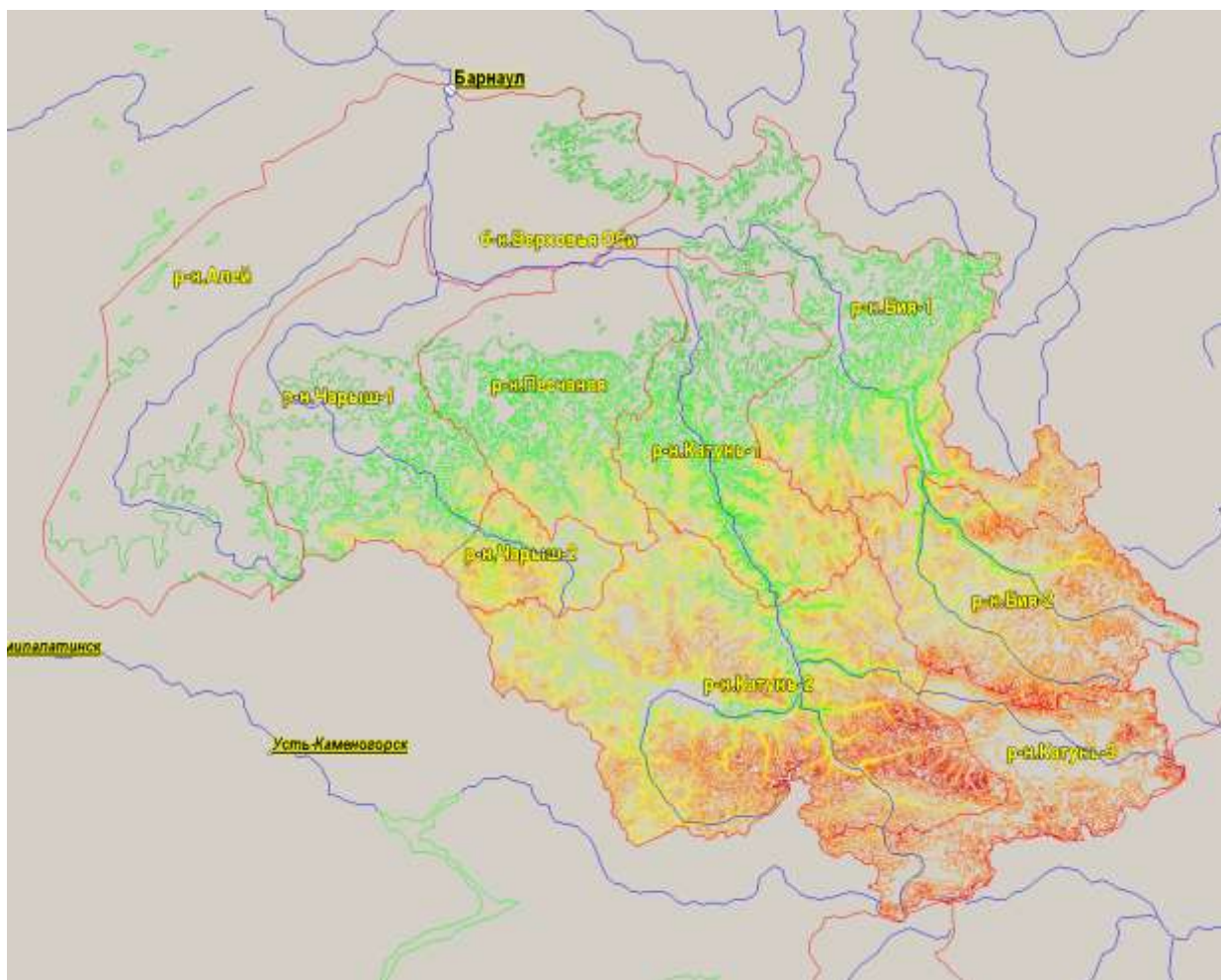


Рис. 2.2 Бассейн Обского водохранилища.

При просмотре изображения для точки местоположения курсора мыши в любой момент времени отображаются географические координаты и значения физических параметров каналов загруженного изображения.

Для ориентирования на изображении на него может быть наложена градусная сетка. В некоторых ГИС, например *ArcView*, автоматически генерируемые градусные сетки отсутствуют, что приводит к необходимости генерировать покрытия градусных сеток вручную, которые к тому же занимают значительное место на диске. В то же время градусная сетка значительно помогает в оценке расстояний, формы, площади или направления на изображении Земли из космоса.

Также можно наложить географическую карту. Программа позволяет накладывать карты, представленные дуговыми share-файлами ГИС *ArcView* классифицированными по одному атрибуту.

В дополнение к этим двум слоям существует слой населенных пунктов. Под населенным пунктом понимается точечный объект, имеющий атрибут численности населения и признак столицы. Численность населения и признак столицы используются для классификации насе-

ленных пунктов при отображении. Населенные пункты для наложения берутся из встроенной базы данных или из внешнего файла в текстовом формате. Название населенных пунктов подписываются справа от него, по правилам оформления карт. Населенные пункты отображаются семью классами, ранжированными по населению. Порядок слоев такой, что крупные населенные пункты отображаются поверх мелких — малочисленные и более значимые перекрывают многочисленные и менее значимые.

Для классификации снежного покрова необходимые исходные данные на интересующий бассейн извлекаются из потока данных *HRPT* на прямоугольный в координатах витка район, охватывающий весь бассейн. Вырезанные из потока данные требуют коррекции географической привязки, поскольку точность привязки витка по алгоритму *SGP* недостаточна. Коррекция привязки выполняется с помощью алгоритма «резиновой поверхности» по ориентирам на местности и карте. После коррекции привязки оператор может приступить к определению площадей заснеженности.

Под определением площадей заснеженности в данной программе понимается выделение снежного покрова среди других видов покрытий земной поверхности и подсчета площади этого покрова в пределах полигональных областей, на которые поделена интересующая часть речного бассейна.

Бассейн — его часть до замыкающего створа — делится на районы, каждый из которых, в свою очередь, поделен на высотные зоны. Районы выделяются по двум критериям. Во-первых, в районы выделяются бассейны самых крупных рек, формирующих сток в прогнозируемом створе. Во-вторых, эти районы делятся на основании сходства и различия ландшафтов. Типичный пример приведен на рис. 1.2. Здесь бассейн Обского водохранилища разбит на бассейны пяти рек (одна река в центре отсутствует в карте гидросети, поэтому район выглядит пустым), два из которых разбиты на две части, а один — на три. Сетка высот определяется имеющейся в наличии цифровой моделью рельефа и одинакова для всех зон. Разбиение бассейна на районы позволяет, при необходимости, подсчитать заснеженность только чистых от облачности зон.

Подсчет площадей выполняется посредством перевода векторного покрытия районов и высотных зон бассейна в растровую форму и последующего подсчета пикселей результата классификации, совпадающих с пикселями растринированного изображения каждой высотной зоны. Растеризация зоны проводится с помощью алгоритма сканирования горизонтальной линией.

Сохранение результатов производится в текстовый файл. Содержимое файла результатов состоит из заголовка и таблицы данных и имеет следующий вид:

Отчет о площадях заснеженности.

Дата: 24-04-2002

Бассейн: Обского водохранилища

Зона	Снег, %	Лес, %	Облака%	Снег	Лес	Облака
Всего	42.94	16.55	40.51	61484	23701	58014
р.Алей	30.08	26.85	43.06	10047	8969	14382
0	36.01	14.66	49.33	14972	6095	20512
1000	8.07	35.48	56.44	1734	7621	12122
2000	10.90	27.38	61.73	1328	3336	7522
3000	21.24	14.36	64.39	2154	1456	6529
4000	37.93	11.84	50.23	4297	1341	5691
5000	58.61	15.26	26.13	7496	1952	3342
6000	77.43	11.36	11.22	9491	1392	1375
7000	90.05	4.24	5.71	9230	435	585
8000	94.70	0.98	4.32	6474	67	295
9000	98.50	0.20	1.30	3026	6	40
10000	99.91	0.00	0.09	1067	0	1
11000	100.00	0.00	0.00	197	0	0
12000	100.00	0.00	0.00	17	0	0
13000	100.00	0.00	0.00	1	0	0
р.Чарыш I	38.49	27.94	33.57	5975	4337	5210
0	36.01	14.66	49.33	14972	6095	20512
1000	8.07	35.48	56.44	1734	7621	12122
2000	10.90	27.38	61.73	1328	3336	7522
3000	21.24	14.36	64.39	2154	1456	6529

и т. д.

За время сопровождения программы постоянно делались попытки усовершенствовать алгоритм классификации снежного покрова. За прошедшие годы с 1995 по 2003 г до реализации стандартного алгоритма классификации снега по данным *MODIS* было перепробовано три варианта, различающихся числом и типами тестов. Далее они кратко рассмотрены.

Эволюция алгоритмов классификации снега по данным NOAA

Основным источником информации для выделения снежного покрова является альbedo поверхности в видимом и ближнем ИК диапазонах. Использование дальнего ИК диапазона и радиационной температуры поверхности целесообразно только как вспомогательное средство для отсеивания грубых промахов. Радиационная температура тающего снега с учетом теплого воздуха над ним не может априори полагаться равной 0,0°C, фактически, она значительно варьируется и может достигать +15°C. В то же время температура неснежной поверхности может

быть любой в пределах, характерных для текущего сезона. Выше сказанное фактически исключает выявление каких-либо решающих функций на основе тепловой съемки.

Отражательная способность снега в среднем велика и сильно зависит от состояния покрова и диапазона спектра. Чистый, свежесвыпавший снег в видимом диапазоне имеет альbedo близкое к 1,0. Альbedo тающего, грязного (запыленного) снега может снизиться до 0,4. К тому же отражательная способность снега сильно зависит от угла падения света по сравнению с другими типами поверхностей. В ближнем ИК диапазоне отражательная способность снега падает, и в районах 1,5 и 2,0 мкм наблюдаются минимумы.



Рис. 2.3 Спектральные коэффициенты отражения снега и облачности [8].

Алгоритм классификации снега, использующий данные с конкретного радиометра, разрабатывается с использованием максимального объема полезной информации имеющейся в составе потока данных. Очевидным критерием для выбора каналов радиометра для классификации служит критерий максимальной информативности пространства признаков в смысле разделения снежного покрова и прочих видов поверхностей. На приведенных выше рисунках представлены спектральные зависимости основных поверхностей, составляющих типовой кадр для алгоритмов классификации снежного покрова.

Учитывая все выше сказанное, для классификации снежного покрова необходимы следующие диапазоны спектра:

Диапазоны спектра для классификации снежного покрова и характеристики типичных покровов земной поверхности.

Длина волны	Высокое альbedo	Среднее альbedo	Низкое альbedo
0,6 мкм	снег, облака	почва	вода, растительность
0,8 мкм	снег, облака	почва, растительность	вода
1,6 мкм	облака	почва, растительность	вода, снег

Все эти диапазоны имеются на современных бортовых радиометрах спутников метеорологического назначения, таких как *AVHRR* на спутниках *NOAA* и *MODIS* на спутниках *Terra* и *Aqua*. Следует отметить, что у радиометра *MODIS* в этих диапазона вдвое более высокое разрешение против радиометра *AVHRR*, а также, что у радиометра *AVHRR* диапазон 1,6 мкм появился только с запуском спутника *NOAA 16* в 2000 году.

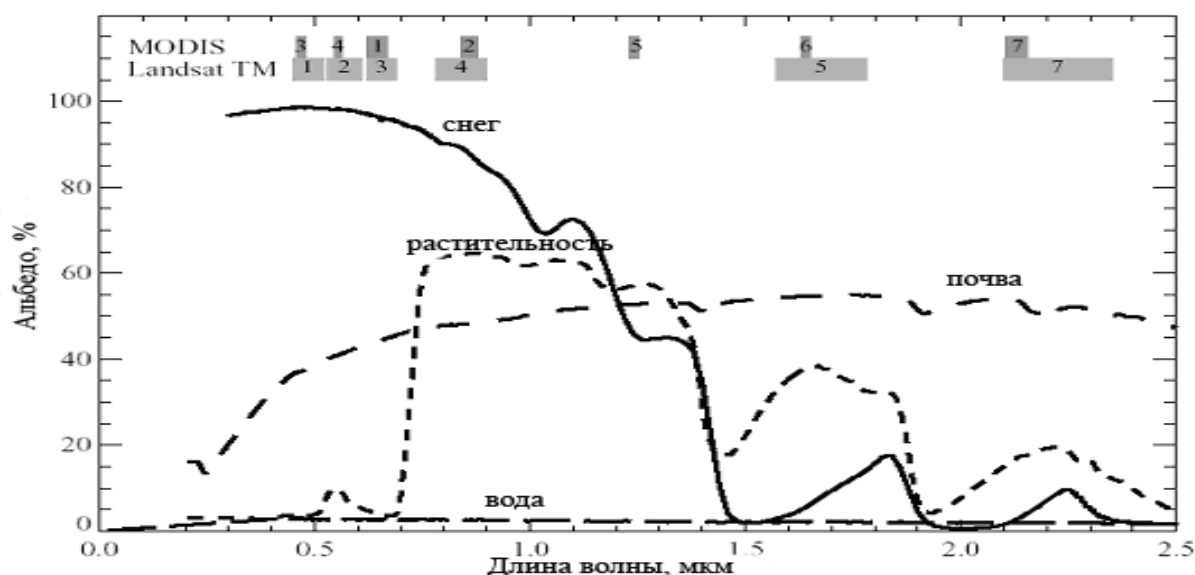


Рис. 2.4 Спектральные коэффициенты отражения различных покровов и полосы пропускания каналов *MODIS* и *TM* [8].

В описываемых далее алгоритмах площадь заснеженности района это доля — относительная или абсолютная — площади района, покрытая снегом. Используя это определение при классификации результатов дистанционного зондирования, необходимо отметить, что оно не акцентирует тот факт, что в кадре, для которого проводится классификация снега в целях получения площади заснеженности, могут присутствовать облака. Если облачность присутствует на площади интересующего района, то классификация проводиться не может, поскольку площади будут заведомо неправильными.

Таким образом, применительно к классификации снежного покрова для определения площадей заснеженности задача выделения облачности сводится к определению только факта

наличия облачности в интересующем районе. В случае её наличия точное определение площадей заснеженности по такому кадру становится невозможным.

Первый алгоритм классификации снега для определения площадей заснеженности был реализован в 1995—1996 годах с использованием данных радиометра *AVHRR* спутников *NOAA*. Он представлял собой простой порог по альбедо в спектральном диапазоне 0,6—0,7 мкм, соответствующем первому каналу *AVHRR*. Математически это выражается следующим образом:

если $R_{0,6\text{ мкм}} > R_n$, то пиксель считается заснеженным, иначе пиксель считается лесом.

Здесь $R_{0,6\text{ мкм}}$ — альбедо в диапазоне 0,6 мкм (первый канал *AVHRR*), R_n — пороговое значение. Этот алгоритм достаточно уверенно разделяет снег и растительность на ландшафтах умеренного пояса при отсутствии облачности. Облачность же, попавшая в пределы классифицируемого кадра практически всегда принимается за снег. Наличие облачности определялось оператором визуально по характерной текстуре изображения. Порог по альбедо R_n выбирался оператором в районе 0,07—0,12 пропорционально освещенности сцены, поскольку калиброванное значение альбедо не корректировалось на высоту Солнца.

Второй алгоритм представляет собой расширенный вариант первого. В нем были добавлены два порога: по температуре и по *NDVI*. Математически он выглядит следующим образом:

если $T < T_{обл}$, то пиксель считался облачностью, иначе

если $R_{0,6\text{ мкм}} > R_n$ и $NDVI > NDVI_n$, пиксель считается заснеженным, иначе пиксель считался покрытым растительностью.

Здесь $T_{обл}$ — порог по радиационной температуре, $NDVI_n$ — порог по *NDVI*.

Порог по температуре пробовался для отсека очень холодных областей, которые интерпретировались как облачность. Порог выбирался оператором, исходя из температурных условий в бассейне, как минимально допустимая температура снега, обычно –15— –20 °C. Но практически использовать его оказалось невозможно, поскольку температура самого холодного снега — на вершинах гор — была ниже температуры облачности на равнинах, и алгоритм либо принимал снег в горах за облачность, либо облачность на равнинах за снег.

Порог по *NDVI* был добавлен для уточнения границы между растительностью и снегом. *NDVI* чистого снега меньше 0,0, обычно –0,05— –0,01, *NDVI* растительности всегда выше 0,0, в период вегетации обычно 0,2—0,6, зимой около 0,0, хвойные породы зимой до 0,1 и выше, *NDVI* облачности всегда близок к 0,0. Порог по *NDVI* исключает из классификации пиксели, похожие на растительность. С весенним развитием растительности *NDVI* растет и ширина переходной зоны от снега к лесу сужается. Порог по *NDVI* выбирался в районе 0,0.

Третий алгоритм представляет собой расширенный вариант второго. В нем добавлены ещё два порога: верхний порог по температуре и верхний порог по альбедо. Математически он выглядит следующим образом:

если $T < T_{обл}$, то пиксель считается облачностью, иначе

если $T > T_{лес}$, то пиксель считается лесом, иначе

если $R_{0,6мкм} > R_{засв}$, то пиксель считается бликом Солнца на водной поверхности, иначе

если $R_{0,6мкм} > R_n$ и $NDVI > NDVI_n$, пиксель считается заснеженным, иначе

пиксель считался покрытым растительностью.

Здесь $T_{лес}$ — порог по радиационной температуре выше которого снег существовать не может, $R_{засв}$ — порог по альбедо засветки от Солнца.

Верхний порог по температуре пробовался для отсека теплых областей, в которых снег лежать не может. Порог выбирался оператором, исходя из температурных условий в бассейне, как максимально допустимая температура снега, обычно +2— +7 С. Но практически использовать его оказалось невозможно. Можно встретить температуру самого теплого пикселя в горах, содержащего помимо снега также и нагретые Солнцем горные породы, выше +15°С, иногда и до +25°С — то есть, сравнимую с температурой окружающего воздуха. Никакой полезной информации этот критерий не добавил, поскольку разность температуры снега и леса порой была в пределах статистической ошибки.

Верхний порог по альбедо был добавлен для исключения засветок от Солнца. В середине сезона снеготаяния некоторые спутники в умеренных широтах имеют такое положение относительно Солнца и Земли, что в область их поля зрения попадает отражение Солнца от зеркала воды. Засветка автоматически засчитывается как снег, фальсифицируя подсчет площадей. Для ее исключения был введен максимальный порог по альбедо. Порог устанавливался оператором в диапазоне 0,35—1,0 в зависимости от ситуации. Но пользы от него было мало, поскольку снег имеет широкий диапазон альбедо, и, отсекая ложные засветки, неизбежно отсекалась какая-то часть самого яркого снега. Более действенным средством в борьбе с засветкой оказалась смена КА на другой, с более благоприятной ориентацией орбиты.

Четвертая версия алгоритма отличается от третьей применением коррекции альбедо на высоту Солнца. Такая коррекция необходима для исключения влияния высоты Солнца на значение альбедо, поскольку оно рассчитывается в предположении вертикального падения лучей. Процедура коррекции проста: необходимо поделить альбедо на косинус зенитного угла направления на Солнце. На широте г. Красноярска поправочный множитель, на который умножается альбедо, меняется в течение года от 5,2 при зимнем солнцестоянии до 1,7 при равноденствиях и до 1,2 при летнем солнцестоянии. Поскольку весеннее таяние снега происходит практически от

равноденствия до летнего солнцестояния, то коэффициент меняется в течение этого сезона не более чем в 1,4 раза. Поэтому значение порога по альбедо в прежних версиях приходилось менять, примерно, от 10% зимой до 15% к концу весны. С введением коррекции на Солнце порог стал постоянным и равным 18% — если альбедо снега лежит в диапазоне 30—95%, то для классификации самого «тёмного» снега при 50% заснеженности порог должен составлять 15%.

Попытки усовершенствовать алгоритм классификации облачности по данным *AVHRR* практически не изменили главное: то, что единственным полезным источником информации являлось высокое альбедо снега, регистрируемое одним каналом сканера. Любой другой класс покрытия поверхности Земли, имеющий высокое альбедо в диапазоне 0,6—1,0 мкм неизбежно принимался этими вариантами алгоритма за снег, и с этим ничего нельзя было поделать, разве что заставить оператора визуально отбраковывать подозрительные кадры.

Ситуация изменилась кардинально с появлением в составе третьей версии сканера *AVHRR/3* канала в диапазоне 1,6 мкм. Как было показано ранее, именно в этом диапазоне снег имеет минимум коэффициента отражения, тогда как другие классы объектов, например, облака такого минимума не имеют. Впервые такой сканер был запущен на КА *NOAA 16*. Однако несколько раньше уже был запущен КА *Terra*, имеющий на борту сканирующий радиометр *MODIS*, также содержащий канал в этом диапазоне, но имеющий вдвое более высокое разрешение. Кроме того, летом 2003 г в Красноярске появилась возможность принимать и обрабатывать данные *MODIS* с КА *Terra*. Учитывая высокую точность стандартной процедуры географической привязки данных КА *Terra*, дальнейшие усилия были направлены на разработку ПО для обработки данных этого КА, но поскольку, не все потенциальные потребители имеют возможность обрабатывать данные *MODIS*, было решено также попытаться адаптировать алгоритмы для таких данных на данные *AVHRR* с КА *NOAA*. В части классификации снега для этого были все предпосылки, так как для всех используемых для этого каналов *MODIS* имелись аналоги в *AVHRR*. В части маскирования облачности только 5 каналов *MODIS* из 10 имели аналоги в *AVHRR*. Пятая версия алгоритма классификации снега по данным *AVHRR* уже использовала метод классификации, разработанный для данных *MODIS*, но в ней ещё не была реализована та часть алгоритма, которая служит для обнаружения части снега в лесу.

На этом эволюция алгоритмов заканчивается, поскольку следующим в 2004 г был реализован алгоритм классификации снега для данных *MODIS*. В следующих двух разделах кратко представлены алгоритм классификации снега и маскирования облачности по данным *MODIS*, как они описаны в документах [8] и [2]. Данные описания и реализации алгоритмов, опубликованные авторами в сети *Internet*, послужили отправным пунктом для написания собственных реализаций алгоритмов в виде модуля расширения программы «*Snow*». В последующих разделах отчёта будут рассмотрены результаты работы алгоритмов.

Автоматическая классификация снега по данным MODIS

Для алгоритма классификации снега авторами был выбран метод группового критерия, включающего отношение каналов и пороговый критерий, исходя из следующих соображений:

1. Его точность уже проверена на разнообразных классах покрытий, опираясь на независимые карты снежного покрова, а ошибки оценены для семи различных покровов с использованием инструментов *Landsat TM* и Авиационного Симулятора *MODIS (MODIS Airborne Simulator, MAS)* ещё до запуска *MODIS*.
2. Он работает автоматически без участия человека.
3. Он может применяться глобально для всей территории земного шара.
4. Он прямолинейный, простой для реализации и не требует вычислительной мощности, а потому прост для понимания конечными пользователями.

Тогда как другие алгоритмы имеют большую точность на региональном или локальном уровнях, они не соответствуют требованиям относительно потребления вычислительных ресурсов, автоматизации и глобальной применимости.

Снег имеет высокий коэффициент отражения в видимой области спектра и, одновременно, высокий коэффициент поглощения в коротковолновой части ИК диапазона (см. рис.). Нормализованный Дифференциальный Снежный Индекс (*Normalized Difference Snow Index, NDSI*), основанный на этих свойствах, является эффективным способом выделять снег из многих других классов поверхностей. Как ярко освещённый Солнцем, так и снег в тени выделяются одинаково эффективно. Доказано, что такой же индекс для растительности, Нормализованный Дифференциальный Индекс Растительности (*Normalized Difference Vegetation Index, NDVI*), может эффективно применяться для глобального мониторинга условий вегетации на протяжении всего года [20, **Ошибка! Источник ссылки не найден.**]. Также с помощью *NDSI* разделяются снег и некоторые виды облачности.

Прочие многообещающие методы, такие как традиционная многоканальная классификация с обучением, спектральное моделирование, нейронные сети, не показали своей пригодности для автоматического применения в глобальных масштабах. Все они, также, требуют большой вычислительной мощности. Обучение или взаимодействие с аналитиком требуется для успешного обучения нейронной сети. Возможно, когда-нибудь эти методы и заменят данный алгоритм, может быть даже обученные с его же помощью.

Описываемый алгоритм «*Snowmap*» [8, 13, 12] разработан для идентификации снега, если он имеется, в каждом пикселе каждого витка данных. На этой основе создаётся глобальный ежедневный продукт. 8-дневный композитный продукт собирается из последовательных ежедневных продуктов. Это даёт максимальный снежный покров за прошедшие восемь дней. Если

пиксель был покрыт снегом хотя бы на одном витке, то этот пиксель засчитывается как снег, даже если во все остальные дни периода там снега не обнаруживалось.

У авторов было много дискуссий на предмет продолжительности периода композитных продуктов [8]. Тогда как недельные композиты соответствовали бы картам *NOAA/NESDIS* и *NOHRSC*, некоторые исследователи были заинтересованы в более продолжительных периодах — от 7 дней до месяца. 8-дневный период был выбран, исходя из оптимальности покрытия земной поверхности данными инструмента *MODIS*. Период повторения спутника равен 16 дням. Если исследователи заинтересованы в композитных продуктах за другой период, они могут их собрать самостоятельно из ежедневных данных.

Индекс *NDSI* успешно применяется для распознавания снега и льда и разделения снега/льда и большей части кучевой облачности. *NDSI* это мера относительной величины разницы в альбедо между видимой и ближней ИК областью спектра, характерной для снега. *NDSI* нечувствителен к изменению освещённости сцены в широких пределах, частично нормирован на влияние атмосферы, и не зависит от альбедо одного канала. Он эквивалентен *NDVI*. Для данных *Landsat TM* *NDSI* рассчитывается по следующей формуле:

$$NDSI = (TM 2 - TM 5) / (TM 2 + TM 5)$$

Пиксели, которые покрыты снегом на примерно на 50% или больше, имеют значение *NDSI* 0,4 в тестовых сценах. Так как водные поверхности также могут иметь *NDSI* 0,4, необходим дополнительный тест для разделения снега и воды. Снег и вода могут быть разделены по альбедо в канале *TM 4*, поскольку для воды оно не превышает 11%. Следовательно, если альбедо пикселя в канале *TM 4* больше 11% и *NDSI* больше 0,4, то пиксель предположительно считается снегом.

Этот порог по *NDSI* был проверен авторами детальным анализом многочисленных сцен *TM*, сравнением с результатами классификации с обучением, а также сверками карт, рассчитанных этим алгоритмом с картами тех же территорий, полученных независимо.

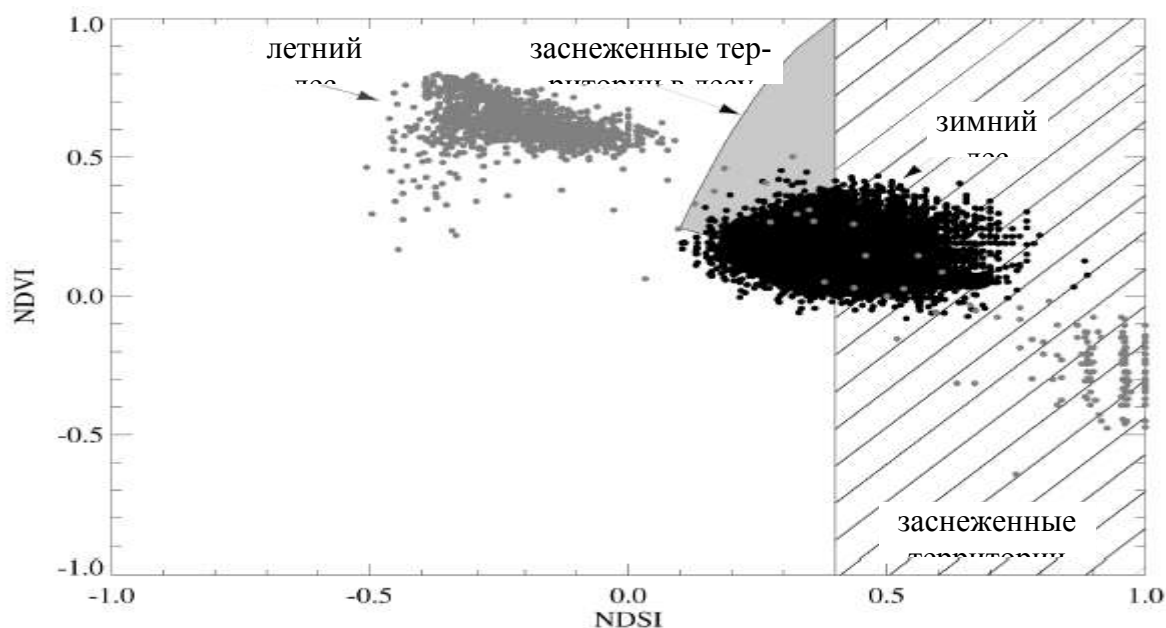


Рис. 2.5 Модификация порога по $NDSI$ для учёта снега в зимнем лесу [8].

Чистый снег имеет высокое значение $NDSI$, но $NDSI$ уменьшается, если пиксель содержит кроме снега другие классы покрытий. В лесистых местах, множество снежных пикселей имеет $NDSI$ меньше 0,4. Чтобы корректно классифицировать такие пиксели как снег, применяется более низкий порог. Для разделения заснеженного и бесснежного леса совместно с $NDSI$ применяется $NDVI$. Лесистые пиксели имеют более высокое значение $NDVI$, чем безлесные. Таким образом, используя оба индекса совместно, можно понизить порог по $NDSI$ только для лесистых территорий, не затрагивая работу алгоритма на других территориях.

Авторами алгоритма разработана зависимость порога $NDSI$ от значения $NDVI$, такая, что включает в класс снега как можно больше пикселей заснеженного леса, в то же время включая туда минимальное количество безлесных пикселей (см. рис.). И, наконец, порог в 10% в канале $TM 2$ предотвращает ошибочное включение пикселей с очень низким альбедо, таких лесонасаждения ели чёрной, в класс снега, как было ранее предложено [6].

Вместо каналов TM в алгоритме используются 4 и 6 каналы $MODIS$ для вычисления $NDSI$. Канал 2 $MODIS$ используется для разделения снега и воды. Канал 4 $MODIS$ используется для исключения участков тёмной растительности. Каналы 1 и 2 $MODIS$ используются для вычисления $NDVI$.

У приведённого выше алгоритма в процессе первоначальной эксплуатации обнаружилась проблема, а именно, он обнаруживал снег там, где его априори быть не может. Одним из таких проблемных мест являлись тёмные, густые леса, особенно в тропиках. Природа этого явления лежит в особенной чувствительности алгоритма к вариациям $NDVI$ и $NDSI$ на тёмной, густой растительности.

Чтобы избавиться от ложного снега в тропиках, был использован тепловой ИК канал в области 11,03 мкм (канал 31 *MODIS*) для оценки температуры поверхности Земли. Этот канал был выбран потому, что он приходится на окно в спектре поглощения атмосферы. Опытным путём был установлен порог в 277 K, исключая от 93 до 98% ложного снега в тропиках. На настоящий момент не ясно, может ли этот тест применяться глобально, особенно в тех местах, где снег точно присутствует.

Анизотропия снежного покрова также может привести к ошибкам в картировании снежного покрова при больших углах сканирования. Снег определённо не является ламбертовским отражателем и имеет максимум коэффициента отражения в перпендикулярном направлении, особенно это характерно для старого снега. Этот максимум перпендикулярного отражения растёт с возрастом снега в ближней ИК области больше, чем в видимой.

Результаты математических оценок показали, что изменения могут быть значительными, и коррекция на угол сканирования (ограничение на максимальный угол сканирования) была реализована. Однако результаты опытных проверок показали, что такая коррекция, возможно, и не нужна.

Авторами алгоритма обнаружена слабая зависимость между углом сканирования и наличием ложного снега, с большей частью ложного снега при больших углах сканирования. Численные тесты показали, что от 35 до 60% снега в сцене могут быть найдены при углах сканирования больше 45°. Также было выяснено, что практически весь ложный снег был найден на обращённой к Солнцу стороне сцены. По этим причинам был установлен максимальный порог по углу сканирования 45° в сторону Солнца и 55° (нет ограничения) в сторону от Солнца.

Реализация алгоритма в виде модуля расширения программы «*Snow*» не вызвала значительных трудностей, поскольку алгоритм достаточно прост. Основной порог по *NDSI* и его модификация в зависимости от *NDVI* закодированы в алгоритм «жестко». Это сделано по двум причинам. С одной стороны, значение порога по *NDSI* не вызывает сомнений. С другой стороны, реализовать пользовательский интерфейс изменений кривой зависимости, который был бы прост и эффективен, не представляется возможным. К тому же подстройка кривой на порядок (по крайней мере, по числу точек аппроксимации кривой) сложнее, чем исследование влияния одного порога. Поэтому основная кривая зависимости порога по *NDSI* от *NDVI* в данной реализации взята как «данность». Возможно, в последствии это будет изменено.

Все остальные пороги: в альбедо во 2 и 4 каналах, по радиационной температуре, по углу сканирования, а также максимальная допустимая доверительность наличия облачности (см. ниже) вынесены в интерфейс пользователя программы и допускают настройку. Цель настройки — оптимизация значений для условий конкретного бассейна.

Автоматическое маскирование облачности по данным MODIS

Алгоритм маскирования облачности по данным *MODIS* показывает, является ли данный пиксель витка свободным от облаков. Алгоритм подразделяется на восемь ветвей согласно типу поверхности и освещённости Солнцем: океан днём, океан ночью, суша днём, суша ночью, снег днём, снег ночью, побережье днём, побережье ночью, пустыня днём, пустыня ночью. Прилагательное «днём» определяется зенитным углом Солнца меньше 85° . «Пустыня» определяется 10-минутной Картой Экосистем Мира Ольсона (*Olson World Ecosystems Data Set*). Маска суша/вода *USGS* с разрешением 1 км служит для разделения суши и воды. В пределах одной ветви применяется один набор тестов, но для вариантов условий поверхности земли (Антарктика, полярные области, пустыня + побережье) могут в пределах этого набора тестов применяться разные наборы пороговых значений. Все возможные варианты наборов тестов, порогов и проверок приведены в табл. 2.3.

После того как ветвь алгоритма для пикселя выбрана, спектральные данные этого пикселя подвергаются ряду пороговых тестов для определения наличия облачности в этом пикселе. В алгоритме применяется несколько типов тестов, ни один из которых не способен обнаружить абсолютно все типы облачности. Но каждый тест нацелен на определённый класс облачности. Тесты для каждого класса облачности сгруппированы для вычисления некоторого среднего промежуточного результата по этому классу, который затем используется для вычисления итогового значения маски облачности. Тесты сгруппированы так, что их независимость максимальна в группе. Хотя, конечно, мало тестов действительно независимы. Большинство тестов отведено по одному биту в массиве бит результата маски облачности. Биты результата вместе с названием теста и используемыми в нём каналами перечислены в табл. 2.2.

Таблица 2.2

Тесты и проверки алгоритма маскирования облачности.

Бит результата	Используемые каналы MODIS	Название и назначение теста или проверки.
8	1, 7, 20, 31	Проверка на пожары или дым от пожаров.
9	1, 26	Проверка на тонкие перистые облака, ближний ИК.
10	1, 2, 5, 19	Проверка на тень от облачности.
11	31, 32	Проверка на тонкие перистые облака, ИК.
13	31	Тест по температуре на 11 мкм на высокую облачность.
14	35	Тест в полосе поглощения CO_2 на высокую облачность.

15	27	Тест в полосе поглощения H_2O на высокую облачность.
16	26	Тест на высокую облачность в ближнем ИК.
17	22 32	Тест разности температур на 4, 12 мкм на тонкие перистые облака.
18 или	31, 32	Тест разности температур на 11, 12 мкм на тонкие перистые облака
18г	29, 31, 32	Трёхканальный тест по температуре 8, 11, 12 мкм на тонкие перистые облака
19	22, 31	Тест разности температур на 11, 3,75 мкм на туман и низкие облака.
20	2	Тест по альбедо на 0.86 мкм на туман и низкие облака.
21	1, 2	Тест отношения видимых каналов на 0.86-0.66 мкм на туман и низкие облака.
22	1, 2	Проверка по <i>NDVI</i> для малых глубин и побережий.
25	31	Проверка пространственной однородности на 11 мкм.
26	27, 31	Проверка по разности температур на 6,5, 11 мкм на чистое небо.
27	31	Тест на временную устойчивость 11 мкм.
28	31, 32	Проверка на пыльные бури.

Все возможные варианты наборов тестов, порогов и проверок приведены в табл. 2.3.

Таблица 2.3

Варианты наборов тестов, значений порогов и проверок.

Ветвь алгоритма	Применяемые тесты по группам					Применяемые проверки
	1	2	3	4	5	
Антарктика днём	15	19				9, 11, 22, 25, 26
Полярный снег днём	15	19		16		9, 11, 22, 25, 26
Побережье полярной пустыни днём	15	18, 19	20	16		9, 11, 22, 25, 26
Полярное побережье днём	15	18, 19	20	16		9, 11, 22, 25, 26
Полярная пустыня днём	14, 15	18, 19	20	16		9, 11, 22, 25, 26
Полярная суша днём	15	18, 19	20, 21	16		9, 11, 22, 25, 26

Полярный океан днём	13, 15	18г, 18, 19	20, 21	16		9, 11, 22, 25, 26
Побережье пустыни днём	14, 15	18, 19	20	16		8—11, 22, 26, 28
Побережье днём	14, 15	18, 19	20	16		8—11, 22, 26
Пустыня днём	14, 15	18, 19	20	16		8—11, 22, 26, 28
Суша днём	14, 15	18, 19	20, 21	16		8—11, 22, 26, 28
Океан днём	13, 14, 15	18г, 18, 19	20, 21	16		9, 11, 22, 25
Снег днём	14, 15	19		16		8—11, 22, 26, 28
Полярный снег ночью	15	19			17	11, 25, 26
Полярная суша ночью	15	18, 19			17	11, 25
Полярный океан ночью	13, 15	18г, 18, 19, 27				11, 25
Суша ночью	14, 15	18, 19			17	11
Океан ночью	13, 14, 15	18г, 18, 19, 27				11, 25
Снег ночью	14, 15	19			17	11, 26

Результат каждого спектрального теста выражается т. н. доверительностью, которая показывает, насколько наблюдаемый спектральный почерк излучения в пикселе совпадает с ожидаемым для данного класса облачности. Например, один из основных тестов над водной поверхностью это «тест холодного облака». Над открытой поверхностью воды яркостная температура ниже ~ 270 К свидетельствует о хотя бы частичном наличии облаков в площади пикселя. Поэтому пороговое значение в этом тесте имеет такое значение. Но реально, регистрируемая яркостная температура варьируется в зависимости от содержания воды в атмосфере в пределах луча зрения сканера. Соответственно, в тесте задаётся «доверительное окно» от 267 до 273 К, при этом, естественно, если температура ниже 267 К, доверительность теста принимается равной 0, а если она выше 273 К — равной 1. Наблюдения с промежуточными значениями температуры принимают остальные значения из диапазона 0,0—1,0, а пороговое значение соответствует доверительности 0,5. На рис. показано соотношение между порогами и доверительностью.

Когда все тесты в группе пройдены, в качестве результата по группе берётся минимальная доверительность. Затем выполняются тесты других групп и выбираются минимальные доверительности в них. На последнем шаге вычисляется конечная доверительность в предположении независимости результатов групп, как корень N -ной степени из произведения доверительностей

N групп. Этот конечный результат и принимается за оценку наличия облачности в пикселе. При использовании этого алгоритма большая часть пикселей имеет или очень высокое значение доверительности ($> 0,95$) или очень низкое ($< 0,05$). Однако всегда найдутся сцены, в которых большая часть пикселей будет иметь промежуточные значения доверительности. В таких случаях дополнительно применяются тесты пространственной или временной однородности. Если однородность обнаруживается, то доверительность улучшается на одну ступень следующего ряда: 0,0, 0,67, 0,95, 1.

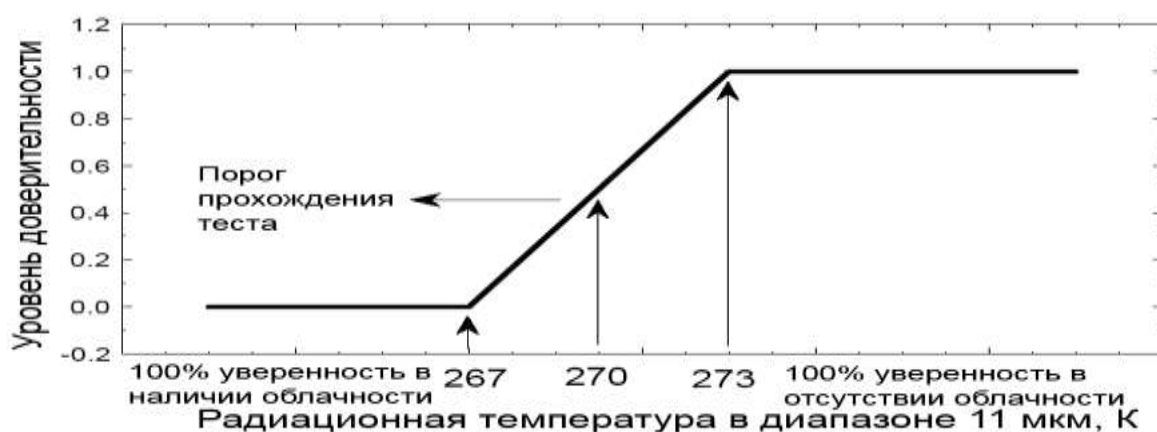


Рис. 2.6 Функция доверительности для простого теста радиационной температуры в окне прозрачности 11 мкм [2].

Таким в общих чертах выглядит алгоритм маскирования облачности в работе [2]. Разбирать его подробнее нет необходимости, и вот почему. Для целей маскирования облачности в пределах бассейна, над частично покрытой снегом землёй можно с некоторой уверенностью использовать только одну ветвь цитированного выше алгоритма, а именно — «снег днём». Поскольку нас интересует именно снег, в процессе своего таяния, который можно уверенно распознать только в светлое время суток, никакая другая ветвь алгоритма не подходит по условиям своей применимости. Поэтому не было необходимости реализовывать весь алгоритм целиком, достаточно было реализовать одну эту ветвь, что и было сделано.

Как видно из табл. 2.3, ветвь «снег днём» содержит в себе четыре теста и семь проверок, а именно:

- Группа 1, тест в полосе поглощения CO_2 на высокую облачность.
- Группа 1, тест в полосе поглощения H_2O на высокую облачность.
- Группа 2, тест разности температур на 11 и 3,75 мкм на туман и низкие облака.
- Группа 4, тест на высокую облачность в ближнем ИК диапазоне.
- Тест на пожары или дым от пожаров.
- Проверка на тонкие перистые облака, ближний ИК диапазон.
- Тест на тень от облачности.

- Проверка по *NDVI* для малых глубин и побережий.
- Проверка по разности температур на 6,5, 11 мкм на чистое небо.
- Тест на пыльные бури.

Учитывая конечную цель работы — высококачественная классификация снега — применение тестов кроме групповых признано нецелесообразным, поскольку:

- пожары попадут в класс «не снега», а дым от пожаров эквивалентен облачности;
- отделение тонких перистых облаков от высоких не требуется, так как влияние различных классов облачности при классификации снега не учитывается;
- тень от облачности на качество классификации снега практически не влияет;
- «малые глубины» на территории речных бассейнов не встречаются, поскольку поверхность водоёмов в бассейн не включается;
- проверка на чистое небо по разности температур на 6,5, 11 мкм применима только в Антарктике;
- пыльные бури в бассейнах рек в период снеготаяния практически не встречаются, но даже если перепутать облачность с пыльной бурей, то качество классификации снега пострадает одинаково.

Поэтому для реализации было отобрано только четыре групповых теста. Тест первой группы на высокую облачность в полосе поглощения CO_2 основан на том факте, что 35-й канал *MODIS* (13,9 мкм) среди прочих (33—36 каналы) имеет весовую функцию с максимумом в относительно холодном слое атмосферы. Только облака выше 500 гПа вносят значимый вклад в излучение в диапазоне 13,9 мкм, и лишь незначительный вклад даёт поверхность Земли. Таким образом, пороговый тест в этом канале должен показывать наличие облачности выше 500 гПа.

Тест первой группы на высокую облачность в полосе поглощения H_2O основан на таком же принципе, что предыдущий описанный. Излучение в районе 6,7 мкм, измеряемое в 27-м канале *MODIS*, испускается парами воды в слое атмосферы между, примерно, 200 и 500 гПа. Радиационная температура, измеренная в этом канале, связана с температурой и влажностью в этом слое. Излучение же в этом диапазоне от низких облаков и земной поверхности поглощается в атмосфере и не достигает датчиков спутника. Таким образом, пороговый тест в этом канале должен показывать наличие облачности в слое от 200 до 500 гПа.

Тест второй группы на низкую облачность основан на разнице в излучении и отражении энергии в двух окнах прозрачности атмосферы: 3,9 мкм и 11 мкм (22 и 31 каналы *MODIS*). Ночью разница между радиационными температурами в 31 и 22 каналах слабо отрицательная из-за более низкой излучающей способности облаков в коротковолновой части спектра. Днём разница строго отрицательная из-за отражения облаками солнечной радиации в коротковолновой части спектра. Средняя и большая разница радиационных температур наблюдается для неодно-

родных сцен (разрывы в облаках), что является следствием закона Планка. Радиационная температура в тёплой порции сцены увеличивается с уменьшением длины волны (коротковолновая часть кривой Планка пропорциональна тринадцатой степени температуры, а длинноволновая — четвертой степени). Малая разница температур наблюдается либо на практически чистых сценах, либо на полностью облачных сценах, промежуточные же варианты дают разницу более 3 К. В табл. 2.4 перечислены варианты пороговых значений для разных сцен, найденные эмпирическим путём.

Таблица 2.4

Пороговые значения теста на низкую облачность по разности радиационных температур в каналах 11 и 3,9 мкм.

Тип сцены	100% чистая сцена	Пороговое значение	100% облачная сцена
Океан днём	<-6.0 К	-8.0 К	>-10.0 К
Океан ночью	<0.5 К	0.6 К	>0.7 К
Суша днём	<-10.0 К	-12.0 К	>-14.0 К
Суша ночью	<0.5 К	0.6 К	>0.7 К
Снег/лёд днём	<-7.0 К	-9.0 К	>-11.0 К
Снег/лёд ночью	<0.5 К	0.6 К	>0.7 К
Пустыня ночью	>-16, <-5 К	-18.0, -3 К	<-20, >-1 К

Тест четвёртой группы на высокую облачность в коротковолновой части спектра основан на том же принципе, что и тесты первой группы. В данном тесте используется сильное поглощение излучения в диапазоне 1,38 мкм (26 канал *MODIS*) парами воды. При достаточной влажности атмосферы (по оценкам, более 4 мм осадчённой воды) излучение с поверхности Земли не сможет достичь датчиков спутника. Поскольку 4 мм — это малая величина для атмосферы в среднем, большая часть земной поверхность будет ненаблюдаемая в этом диапазоне. Так как только относительно малая часть воды находится высоко в тропосфере, высокие облака будут выглядеть яркими, низкие и средние будут тёмными из-за поглощения в атмосфере. Однако, [3] анализируя сцены с *AVIRIS*, показал, что обнаружение облаков в диапазоне 1,38 мкм может быть невозможным при высокой местности (в горах), сухой атмосфере и высокого альбедо подстилающей поверхности. Также, выбросы вулканических аэрозолей в стратосферу могут повлиять на результаты этого теста. Пороговые значения для этого теста основаны на теоретических расчётах по модели множественного рассеяния, в которой принято отсутствие отражения от земной поверхности.

Реализация алгоритма в виде модуля расширения программы «*Snow*» не вызвала значительных трудностей, поскольку сам алгоритм прост и прямолинеен. Для автоматической обра-

ботки данных результаты маскирования облачности — доверительность наличия облачности в диапазоне от 0 до 1 для каждого пикселя — используется в алгоритме классификации снега для маскирования облачных пикселей следующим образом. Если доверительность наличия облачности больше некоторого порогового значения, то в результате классификации снега записывается, что в данном пикселе облачность, иначе выполняется классификация снега по описанному выше алгоритму. Возможность варьирования порога доверительности позволяет исследовать чувствительность классификации снега по отношению к ошибкам в маскировании облачности.

Алгоритм вычисления композитных изображений

Неустранимое наличие облачности практически на каждом кадре изображения побуждает к поискам методов экстраполяции данных на подоблачное пространство, иначе становится фактически невозможно надёжно определять заснеженность речного бассейна на регулярной основе. До сезона 2005 года из-за отсутствия надёжного алгоритма маскирования облачности экстраполяция данных в программе «*Snow*» не могла быть реализована в принципе. Из всего набора ежедневных данных использовались только считанные витки, с площадью облачности на снимке, не превышающей 10% площади бассейна. Таких снимков набиралось всего по несколько штук за сезон. Часто не удавалось получить чистый снимок бассейна в течение месяца и дольше. С реализацией же более-менее надёжного алгоритма маскирования облачности стало возможно исследовать различные методы экстраполяции.

Стандартным методом устранения облачности, предложенным авторами алгоритма классификации снега является построение композитного изображения за несколько последовательных суток — временную экстраполяцию пространственных данных [8]. Для данных КА *Terra* ими был выбран период композита, равный 8 суткам, что кратно периоду повторения наземной траектории КА, равному 16 суткам. Метод композиции нескольких изображений заключается в следующем. Композиции подвергаются результаты классификации снега. Для каждого пикселя просматриваются все наблюдения за период композита. Если хотя бы на одном снимке есть снег, то результатом композиции становится снег. Иначе, если все наблюдения одинаковы, то результатом становится то же значение. Иначе, если хотя бы на одном снимке есть не снег, то результатом композиции становится не снег. Иначе, если хотя бы на одном снимке есть облачность, то результатом становится облачность.

Легко видеть, что в этом алгоритме предпочтения отдаются результатам классификации в следующем порядке, по убыванию: снегу, не снегу, облачности, отсутствию данных. Иными словами, этот алгоритм оптимистичен в отношении снега. Авторы подчёркивают это, утверждая, что их алгоритм даёт максимальное покрытие снегом за последние 8 дней. С точки зрения глобального мониторинга снежного покрова планеты Земля это является вполне разумным вы-

бором. С точки же зрения мониторинга динамики снеготаяния речного бассейна в весенний период такой выбор будет весьма спорным решением.

Поскольку весной, в среднем, снег тает (хотя выпадают и твёрдые осадки), то такой алгоритм композиции будет, в среднем, отставать от реальной заснеженности. Для весны, в среднем, точнее будет алгоритм, пессимистичный по отношению к снегу — такой, который в первую очередь ищет и берёт в качестве результата отсутствие снега в пикселе. Однако случай выпадения твёрдых осадков и такой алгоритм не учитывает. В качестве варианта решения можно предложить за результат брать самый последний значимый результат в пикселе — снег или не снег, но не облачность. В этом случае композит будет содержать «самое свежее полезное» значение. Таким свойством первые два варианта не обладают.

Для практического использования композитных данных в программе «*Snow*» были реализованы все три варианта композитов, рассмотренных выше. Очевидно, что первые два варианта композитного значения — оптимистичный и пессимистичный по отношению к снегу — являются граничными значениями для третьего варианта и дают абсолютное значение диапазона изменения заснеженности. Такая оценка вероятных границ интересующей величины предпочтительнее по сравнению с единственным значением при использовании данных в прогнозах.

Автоматизация обработки данных

Процесс обработки 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. Большое количество разнообразных процедур, выполняемых регулярно по нескольку раз в день, делает весьма обременительным обслуживание системы оператором. Тем более трудна исследовательская работа по подбору параметров, которая включает многократную обработку одних и тех же данных с разными значениями настроек. Особенно это важно в случае, когда обрабатываемые данные занимают большой объём, а обработка всего их объёма длится часами.

В первую очередь для того, чтобы исключить рутинные операции, а также повысить производительность исследовательской деятельности, был реализован модуль автоматической обработки данных. В последующем (во вторую очередь) этот модуль станет основой полностью автоматической системы мониторинга площадей заснеженности речных бассейнов.

Требования эффективной обработки данных заставляют максимально оптимизировать построение вычислений, минимизируя накладные расходы, связанные с хранением промежуточных данных. С одной стороны, желательно уменьшить занимаемый промежуточными результатами объём дисковой памяти. С другой стороны, нежелательно каждый раз пересчитывать заново одни и те же результаты. Поэтому все процедуры обработки были сгруппированы таким

образом, чтобы результаты работы каждой группы были достаточно весомыми, чтобы согласиться на сохранение их в дисковой памяти, а в пределах одной группы процедур данные передавались бы через оперативную память без сохранения в дисковой памяти (см. рис. 2.7).

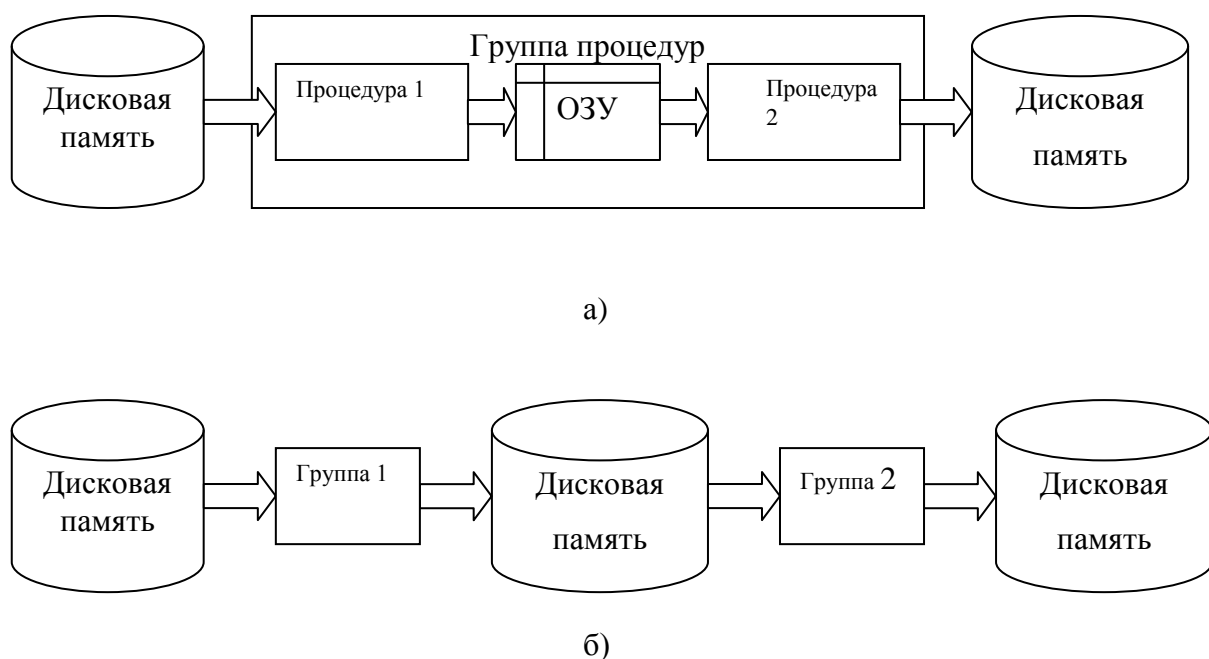


Рис. 2.7.Схема группировки процедур: а) передача данных между процедурами в группе; б) передача данных между группами процедур.

Ещё один аргумент в пользу выбранной схемы построения обработки заключается в возможности проводить обработку частями. Данная возможность реализуется в том, что перед началом обработки просматривается время модификации всех файлов результатов, и затем они анализируются с использованием причинно-следственных связей между ними. В процессе анализа времен модификации файлов строится план обработки, в котором отмечается последовательность загрузки и/или вычисления результатов каждой группы процедур. Новые результаты по новым исходным данным просто рассчитываются и сохраняются, устаревшие результаты пересчитываются и сохраняются заново. При таком построении алгоритма обработки файловая система результатов при запуске в любой момент будет приведена в корректное состояние по окончании обработки. Прерывание же обработки не приведёт к необходимости пересчитывать всё с начала — недостающие результаты будут просто досчитаны при следующем запуске. Таким образом, построенная система будет сама восстанавливаться при сбоях.

На настоящий момент обработка данных о заснеженности состоит из 5 групп процедур:

1. Подготовка исходных данных с витка:
 - 1.1. вырезка фрагмента на территорию бассейна;
 - 1.2. перевод фрагмента в картографическую проекцию;

- 1.3. создание обзорного изображения фрагмента.
2. Классификация:
 - 2.1. маскирование облачности;
 - 2.2. классификация снежного покрова;
 - 2.3. создание обзорного изображения;
 - 2.4. подсчёт площадей заснеженности;
 - 2.5. создание отчёта о площадях заснеженности.
3. Расчёт суточного композита:
 - 3.1. расчёт суточного композита;
 - 3.2. создание обзорного изображения суточного композита;
 - 3.3. подсчёт суточных площадей заснеженности;
 - 3.4. создание отчёта о суточных площадях заснеженности.
4. Расчёт 8-дневного композита:
 - 4.1. расчёт 8-дневного композита;
 - 4.2. создание обзорного изображения 8-дневного композита;
 - 4.3. подсчёт 8-дневных площадей заснеженности;
 - 4.4. создание отчёта о 8-дневных площадях заснеженности.
5. Подсчёт пространственной статистики.
 - 5.1. подсчёт пространственной статистики бассейна.

Потоки данных на схеме расчета продуктов приведены на рис. 2.8.

Результатами обработки каждой группы процедур являются многоканальные изображения, а также (кроме 1 и 5 групп) текстовые файлы табличных данных о заснеженности. Результаты-изображения сохраняются во внутреннем представлении программы «*Snow*», оптимизированном для обработки данных. Обзорные изображения представляют собой снимки результатов, подготовленные для использования вне программы «*Snow*», поэтому они сохраняются в распространённых графических форматах «*JPG*» и «*PNG*». Табличные данные подготавливаются в двух видах: оптимизированные для обработки в табличных процессорах и оптимизированные для непосредственного чтения человеком (т. н. отчёты о площадях заснеженности).

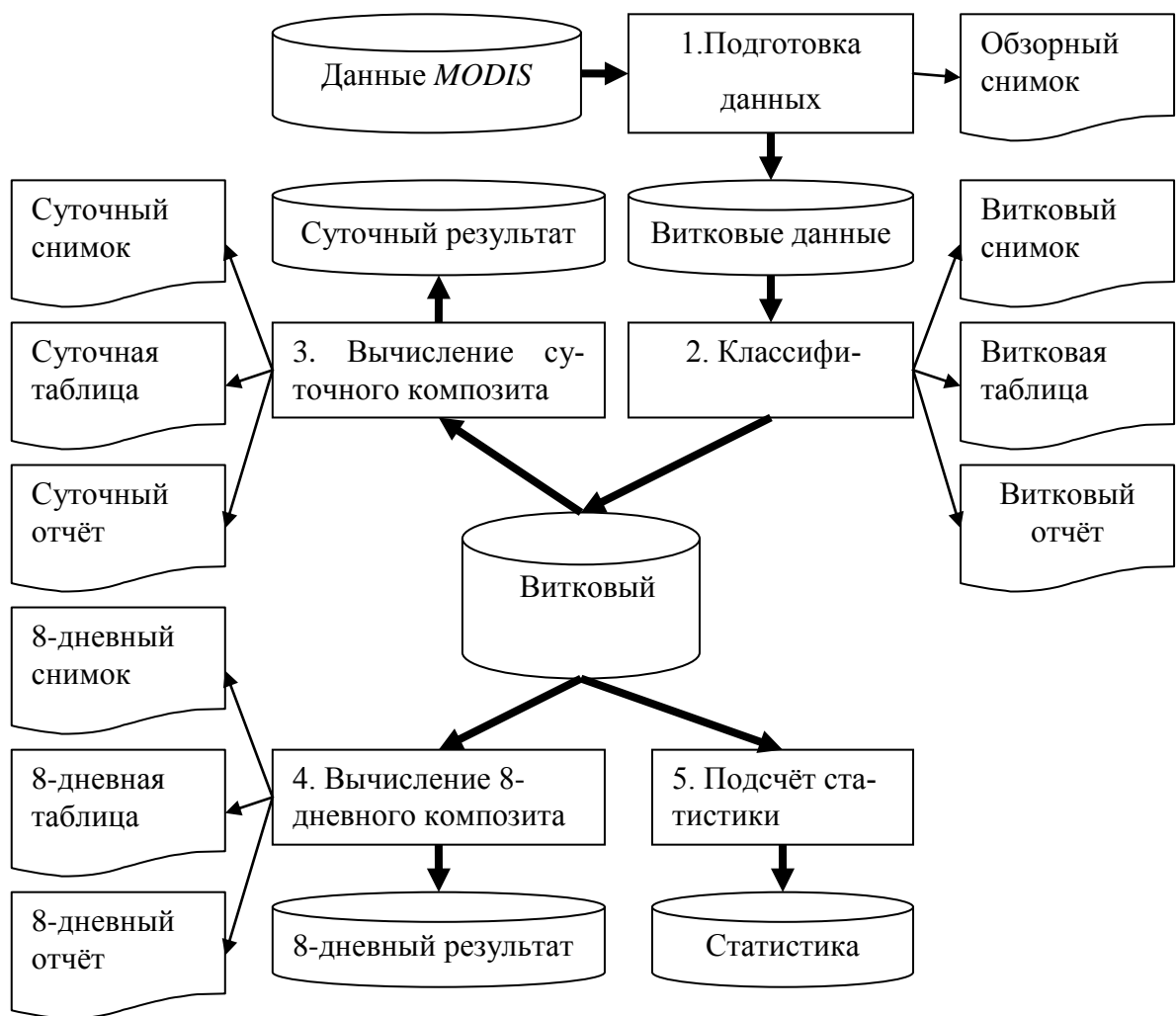


Рис. 2.8 Схема обработки данных.

Выводы

Широкий набор спектральных каналов радиометра *MODIS* и дополнительные данные бортового навигационного оборудования для географической привязки дают уникальную возможность создавать полностью автоматическую системы обработки данных дистанционного зондирования земной поверхности. В рамках работ договору на основе стандартных алгоритмов обработки данных *MODIS* реализованы отдельные модули расширения для ранее разработанной программы «*Snow*», предназначенной для определения площадей заснеженности речных бассейнов по данным спутников *NOAA*. Разработанные модули позволяют на базе существующей программы «*Snow*» обрабатывать данные радиометра *MODIS*.

По сравнению с разработанными ранее алгоритмами обработки данных *NOAA*, новые реализованные алгоритмы для обработки данных *MODIS* имеют ряд существенных преимуществ:

- Точность автоматической географической привязки данных *MODIS* достаточна для целей определения площадей заснеженности речных бассейнов и не требует дополнительной коррекции.

- Спектральные характеристики набора каналов радиометра *MODIS* позволяют с достаточной надёжностью автоматически классифицировать большинство видов облачности и уверенно распознавать снежный покров даже сквозь кроны деревьев в некоторых типах леса.

- Автоматические алгоритмы обработки данных позволяют в будущем создать полностью автоматическую систему мониторинга снежного покрова.

2.3 Исследование алгоритмов классификации данных MODIS

Для исследования достоверности выдаваемых результатов реализации алгоритмов были протестированы на трёх наборах данных для бассейнов Обского, Красноярского и Саяно-Шушенского водохранилищ. Каждый набор данных включал информацию со всех витков КА *Terra*, принятых и обработанных на станции приёма фирмы *ScanEx* в г. Красноярске, с февраля по май 2005 года. Подробно состав и объём наборов данных приведён в разделе 2.5 настоящего отчёта. Далее в этом разделе рассматриваются оценки достоверности результатов классификации снега и маскирования облачности на этих наборах данных.

Исследование алгоритма классификации снега

Оценка точности алгоритма классификации снега должна вестись, учитывая два типа возможных ошибок: обнаружение ложного и пропуск настоящего снега. Учитывая наличие облачности практически на каждой снимке необходимо отдельно рассматривать обнаружение ложного снега на пропущенных алгоритмом маскирования облачности облаках. Такие ошибки правильно будет считать ошибками маскирования облачности, которые будут рассмотрены в подразделе 2.3.2.

Наиболее объективная оценка точности классификации данных дистанционного зондирования может быть сделана только при наличии наземных измерений. В области картирования снежного покрова не менее точным можно считать использование спутниковой съёмки высокого разрешения — с КА *Landsat*, например, как это делалось разработчиками алгоритма [10]. К сожалению, данных высокого разрешения на исследуемый период в наличии нет, поэтому оценки точности делались по косвенным признакам.

Значение порога по радиационной температуре

Первым замеченным недостатком стандартного алгоритма был порог по яркостной температуре. Введенный авторами для подавления ложного снега в тропических областях он имеет типовое значение $+4^{\circ}\text{C}$. По мысли авторов, снег при такой температуре существовать не может, поскольку она выше температуры плавления воды. Хотя введением такого порога проблема

ложного снега в тропических областях была решена, есть серьёзные возражения против его применения.

Во-первых, снег при такой температуре существовать не может, только если она держится достаточно долго для того, чтоб он успел растаять. Если же мы рассматриваем весенний период, в который снег как раз интенсивно тает, то нет никаких оснований считать положительные температуры гарантией отсутствия снега. К тому же, как раз динамика таяния снега и является предметом мониторинга с использованием данного алгоритма.

Во-вторых, возможны и стационарные ситуации, в которых снег даже не будет таять при регистрируемой радиационной температуре выше 0°C . Рассмотрим горную местность, для простоты будем считать, что территория одного пикселя почти поровну покрыта только двумя видами покрытия: чуть больше половины снегом и чуть меньше половины, скажем, голыми скалами или сухой травой. Такая ситуация вполне возможна. Согласно основному критерию классификации значение *NDSI* такого пикселя будет больше 0,4, т.е. пиксель должен будет засчитан как покрытый снегом. Однако, если оценить среднюю радиационную температуру такого пикселя, то, из-за нагревания Солнцем другой, чистой от снега половины, она вполне может быть больше не только 0°C , но и положительных температур. Достаточно теплового контраста в несколько градусов, чтоб стационарная ситуация с более, чем 50% снега в пикселе, не прошла критерий по радиационной температуре. И такие ситуации на практике часто встречаются во всех бассейнах Саян и Алтая. Так, на Алтае, в бассейне Обского водохранилища регистрировались температуры заснеженных пикселей до $+16^{\circ}\text{C}$ и выше, при этом работала ветвь алгоритма для безлесных пикселей, и все остальные пороговые тесты, кроме температурного, проходились «с запасом».

Учитывая выше сказанное, порог по температуре во всех дальнейших исследованиях был установлен в $+27^{\circ}\text{C}$ (максимальные наблюдавшиеся температуры в бассейнах за исследованный период), и в будущем, возможно, будет удалён из алгоритма совсем. Для данной области применения алгоритма ложный снег в тропических районах, исключаемый температурным порогом, проблемы не представляет.

Ошибка опубликованной реализации алгоритма

Подробный анализ результатов классификации бассейна Обского водохранилища за май 2005 г обнаружил снег по берегам р. Обь в самом нижнем районе бассейна (см. рис. 2.1). За снег были приняты пиксели, расположенные по берегам р. Обь, для которых были характерны значения *NDSI* 0,1—0,3, значение *NDVI* 0,2—0,4, значения альбедо во 2 канале 12—13% и в 4 канале 8—9%, радиационная температура $+15—+16^{\circ}\text{C}$.

Согласно алгоритму, из-за низкого значения $NDSI$, пиксели с такими спектральными характеристиками могли быть приняты за снег только во второй ветви алгоритма, которая обнаруживает снег в лесу. Разбор алгоритма показал, что в опубликованном алгоритме, с которого делалась собственная реализация, присутствует ошибка. Ошибка заключается в том, что во второй, «лесной» ветви алгоритма не проверялись пороги во 2 и 4 каналах, а проверялся только один порог — по $NDSI$, модифицированный согласно величине $NDVI$. Таким образом, алгоритм работал в той части пространства признаков, которая самими авторами была отмечена как область ошибок классификации. Иными словами, не делалось проверок на водную поверхность (порог по 4 каналу) и участки тёмной растительности (порога по 2 каналу). Как раз места обнаружения ложного снега приходились на берег широкой реки.

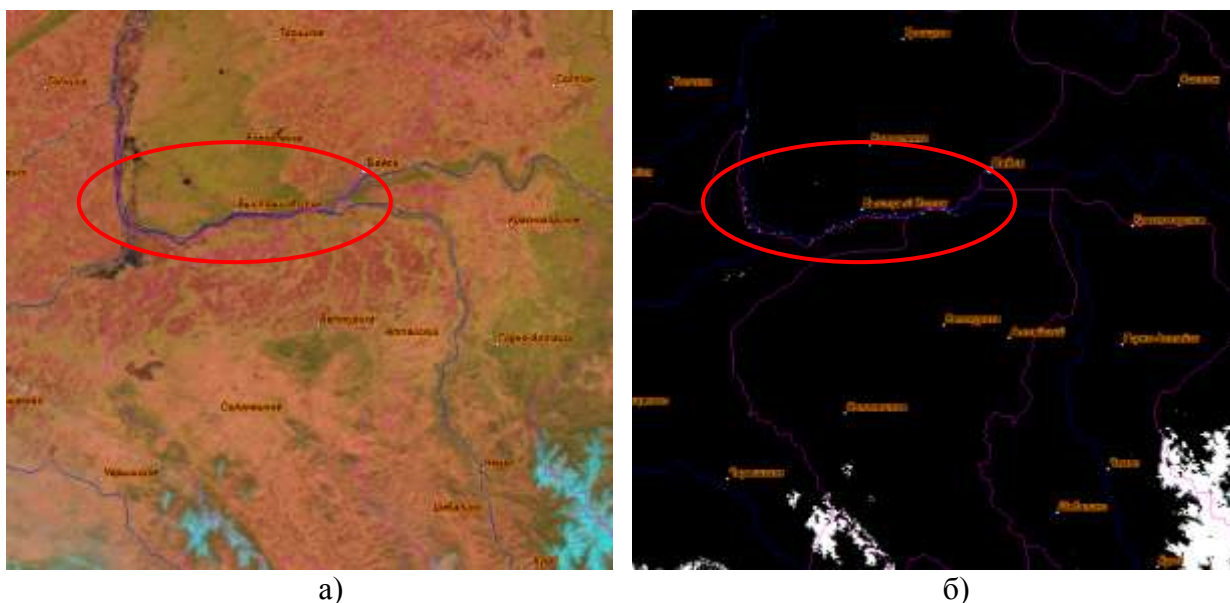


Рис. 2.1 Обнаружение ложного снега по берегам р. Обь 31 мая 2005 г.: а) комбинация 6, 2 и 1 каналов MODIS; б) результаты классификации снега (снег белым).

Алгоритм был модифицирован, вернее сказать, приведён в соответствие описанию в документе [8], которому не соответствовала опубликованная реализация. Модификация алгоритма полностью устранила ложную идентификацию снега на проблемных сценах.

Исследование алгоритма маскирования облачности

Результаты классификации облачности собственной реализацией части алгоритма подверглись пристальной проверке, поскольку многочисленные попытки классификации облачности по данным *NOAA* в процессе разработки программы «*Snow*» не привели к успеху. В целом, можно признать результаты работы алгоритма маскирования облачности по данным *MODIS* удовлетворительными, естественно в пределах реализованной части. При этом сами авторы ал-

горитма признают, что корректная классификация облачности над снегом является одной из самых сложных задач, к решению которой они смогли только приблизиться.

По результатам тщательной проверки алгоритма маскирования облачности за период с февраля по май 2005 г. на территории трёх бассейнов водохранилищ можно констатировать факт, что присутствуют оба класса ошибок классификации: как ложные облака, так и пропуски существующей облачности, — причём в обоих случаях человеку не составит труда правильно идентифицировать облачность. Исследования конечного результата — доверительности наличия облачности — были признаны недостаточными, и был проведен анализ результатов каждого теста в отдельности, чтобы правильно идентифицировать источник ошибок. Но три теста из четырёх не показали никаких ошибок.

Тесты первой группы на высокую облачность показали хорошие результаты. Как тест в полосе поглощения CO_2 , так и тест в полосе поглощения H_2O реагировали только на высокую облачность. Обнаружения ложной облачности за ними не наблюдалось. Высокая облачность составляет небольшую долю облачного покрова, поэтому эти тесты «работают» относительно редко. Как правило, на тех же пикселях реагирует тест второй группы по разности радиационных температур. Как и должно быть, на снимках с разнообразной облачностью тест в полосе поглощения CO_2 показывает меньшую площадь облачности, чем тест в полосе поглощения H_2O , поскольку реагирует на излучение более высоких слоёв атмосферы, а количество облачности с высотой уменьшается.

На рис. 2.10 приведены результаты классификации сцены с разнородной облачностью всеми четырьмя тестами. На кадрах результатов приведена доверительность наличия облачности, белый цвет соответствует 1,0, чёрный — 0,0. Полосатая структура изображения на некоторых кадрах вызвана отличиями в калибровках между датчиками разных строк изображения (всего 10 датчиков строк).



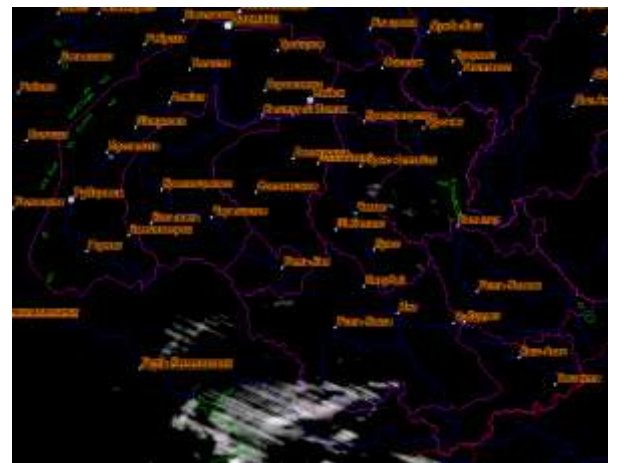
а)



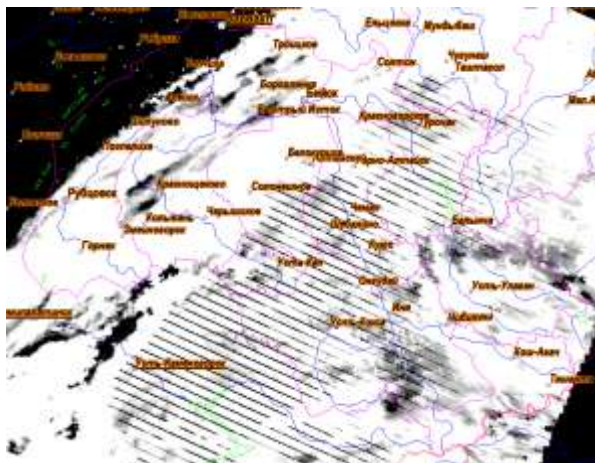
б)



в)



г)



д)



е)

Рис. 2.10. Результаты классификации облачности различными тестами сцены бассейна Обского водохранилища 7 мая 2005 г: а) исходная сцена (каналы 6, 2, 1 *MODIS*); б) общий результат маски облачности; в) тест на высокую облачность в полосе поглощения CO_2 (13,9 мкм); г) тест на высокую облачность в полосе поглощения H_2O (6,7 мкм); д) тест на низкую облачность по разнице рад. температур в 3,9 и 11 мкм; е) тест на высокую облачность в диапазоне 1,38 мкм.

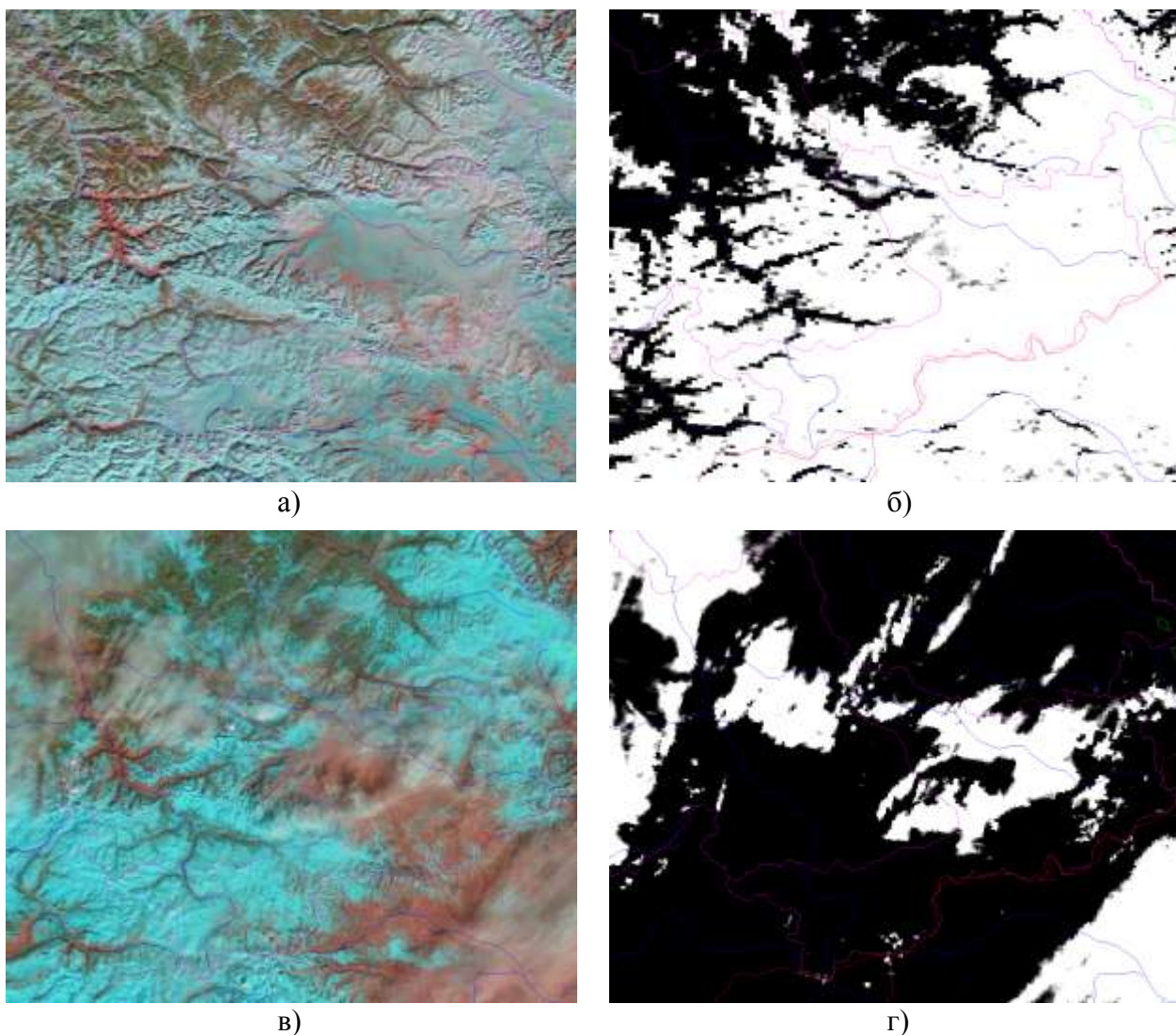


Рис. 2.12.11 Ошибки идентификации облачности теста в диапазоне 1,38 мкм на примере юго-восточной части бассейна Обского водохранилища: а) 16 февраля 2005, композит 6, 2, 1 каналы *MODIS*; б) 16 февраля 2005, результат теста в диапазоне 1,38 мкм; в) 28 марта 2005, композит 6, 2, 1 каналы *MODIS*; г) 28 марта 2005, результат теста в диапазоне 1,38 мкм.

Тест второй группы на низкую облачность по разнице радиационных температур в каналах 3,9 и 11 мкм также показал хорошие результаты. Единственным недостатком его является «полосатая» структура, вызванная детектором с сильно отличающимися калибровочными характеристиками (т.н. «битый» детектор). Тест четвёртой группы на высокую облачность в диапазоне 1,38 мкм оказался проблемным. Он единственный из тестов идентифицировал ложные облака. Метод идентификации облаков этого теста зависит от влажности нижней атмосферы, которая должна поглощать излучение в диапазоне 1,38 мкм от поверхности Земли. Однако одновременное сочетание трёх неблагоприятных для теста факторов: низкой влажности, высокого альbedo подстилающей поверхности и значительной высоты местности (горного рельефа) при-

водят к тому, что излучение поверхности не поглощается полностью в нижней атмосфере, и идентифицируется тестом как высокая облачность. Высота рельефа, достаточная для возникновения ложной облачности составляет по оценкам, примерно, 1,5 км.

Такой эффект наблюдается не всегда. При значительной влажности ложных облаков от горного рельефа не наблюдается. На рис. 2.12.11 показана одна и та же местность — юго-восточная часть бассейна Обского водохранилища — за 16 февраля и 28 марта 2005 г в двух вариантах: цветной композит и результат работы теста на высокую облачность в диапазоне 1,38 мкм. На цветном композите видно, что 16 февраля весь район практически чистый от облачности, но на результатах теста присутствуют ложные облака в высокогорной части, повторяющие очертания рельефа. В то же время, на снимках за 28 марта та же высокогорная область рельефа уже корректно не идентифицируется как облачность. Разница между этими снимками — в погодных условиях. Во время первого снимка стояла сухая холодная погода, вызванная антициклоном, температура воздуха в районе около -25°C . Во втором случае погода была тёплой, температура воздуха в районе около 0°C , в долинах тает снег, что, видимо, и создаёт влажность воздуха достаточную для корректной работы теста. Представляется возможным в будущем модифицировать этот тест, введя варьирование пороговых значений в зависимости от высоты места и оценки влажности воздуха.

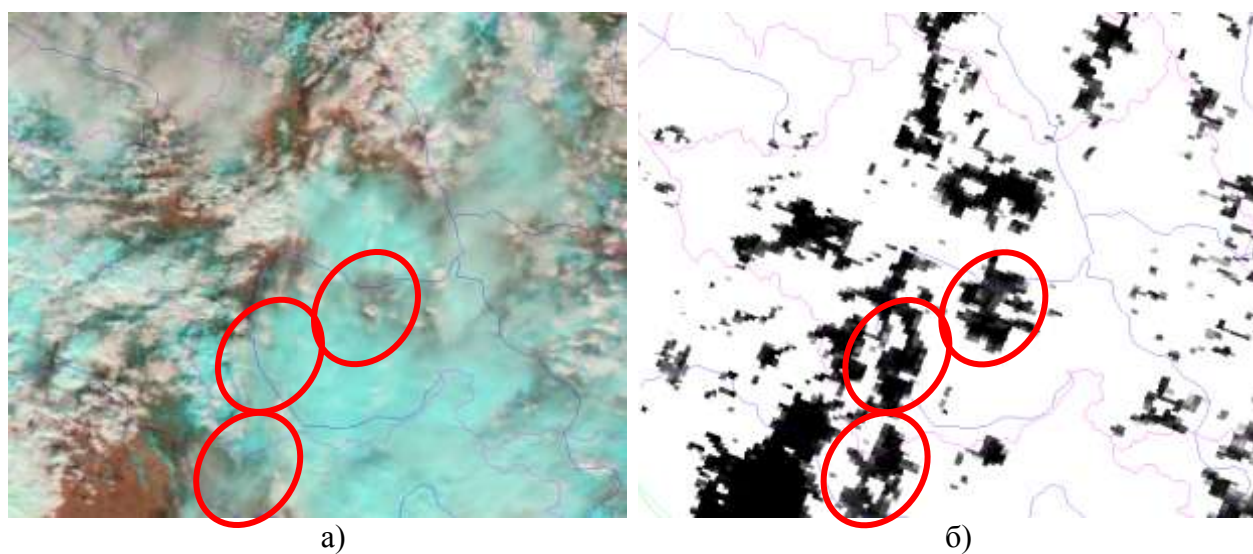


Рис. 2.12 Пропуск некоторых участков облачности алгоритмом маскирования:
а) цветной композит из 6, 2, 1 каналов *MODIS*; б) результат маскирования облачности.

Вторым недостатком алгоритма в целом является его недостаточная чувствительность — он пропускает участки облачности, которые не классифицируются ни одним из его тестов. Поскольку ни один тест их не классифицирует, то невозможно отнести такие ошибки какому-то одному тесту. Пропущенные облака затем неправильно идентифицируются алгоритмом классификации снега, порождая недостоверные пиксели классов снега или не снега.

Попытки как-то охарактеризовать класс пропускаемой облачности показали следующее. В основном, пропускаемая облачность имеет малую разницу между яркостными температурами в 11 и 12 мкм (31 и 32 каналы *MODIS*), что говорит о её низкой водности, поскольку эти каналы отличаются в спектральном отношении только степенью поглощения парами воды. Также эта облачность имеет низкий коэффициент отражения в каналах 1,6 и 2,0 мкм (6 и 7 каналы *MODIS*), что может говорить о наличии кристаллической воды в облаке. Коэффициент отражения в видимых и ближних ИК каналах близок к таковому у полупрозрачной облачности, которая, тем не менее, не позволяет разглядеть подстилающую поверхность. Яркостная температура такой облачности ничем не отличается от соседних участков, которые нормально идентифицируются как облачность. Пример ошибочных пропусков такой облачности приведён на рис. .

Следует отметить, однако, что доля такой пропущенной облачности в среднем сравнительно мала. По глазомерным оценкам она не превышает единиц процентов на тех снимках, на которых она есть, а есть она далеко не на каждом снимке. Поэтому было решено пренебречь её наличием, хотя это порождает некоторые неприятные результаты, как, например, доли процента ложного снега в летнее время в нижних высотных зонах бассейнов.

Сравнение результатов классификации снега по данным Terra/MODIS и NOAA/AVHRR

Для оценки влияния на гидрологические модели смены алгоритма классификации снега и информации КА *NOAA* на данные КА *Terra* было проведено сравнение результатов классификации всеми алгоритмами нескольких сцен за период весны 2005 года. Для сравнения были отобраны несколько практически чистых от облачности снимков бассейнов Обского и Красноярского водохранилищ из оперативного архива данных КА *Terra* за 2005 год. Бассейн Саяно-Шушенского водохранилища не рассматривался, так как он большой и редко бывает целиком чистым от облачности. На выбранные даты были подготовлены аналогичные снимки по данным КА *NOAA 17*. Две серии снимков были классифицированы без маскирования облачности следующими алгоритмами в следующих сочетаниях:

- алгоритм для *AVHRR* версии 3 на данных *NOAA 17*;
- алгоритм для *AVHRR* версии 4 на данных *NOAA 17*;
- алгоритм для *MODIS* на данных *NOAA 17*;
- алгоритм для *MODIS* на данных *MODIS*.

С результатами последней комбинации данных и алгоритма сравнивались первые три. Отдельно сцены *MODIS* были классифицированы с учётом маскирования облачности. Результаты маскирования облачности были подвергнуты пристальному анализу и ручной коррекции ошибок классификации облачности, упомянутых в предыдущем подразделе.

Результаты по целым бассейнам приведены в табл. 2.5.

Таблица 2.5

Классификация разными алгоритмами данных КА *Terra* и *NOAA* на бассейны Обского и Красноярского водохранилищ весны 2005 г.

Дата	Время приёма КА		Доля пикселей классов для алгоритмов, %				
			Облаков	Снега			
			Данные <i>MODIS</i>			Данные <i>NOAA 17</i>	
	Terra	MODIS	MODIS			Вер. 4	Вер. 3
1	2	3	4	5	6	7	8
Бассейн Красноярского водохранилища							
04.02	04:07	04:41	10,1	81,6	89,7	73,8	56,0
07.02	04:38	05:13	0,3	89,7	81,6	64,9	55,4
02.03	04:44	04:47	5,5	83,1	83,0	73,7	57,0
03.03	05:27	04:25	0,0	72,5	71,4	68,6	47,3
10.03	05:33	05:06	3,3	86,0	90,2	76,1	50,6
11.03	04:38	04:42	0,0	85,7	84,9	73,4	47,5
22.03	04:20	05:32	8,6	70,5	68,3	59,9	50,8
31.03	04:14	05:26	6,0	43,7	47,7	42,3	37,4
09.05	04:20	03:56	15,0	14,6	11,5	25,0	27,1
Бассейн Обского водохранилища							
07.02	04:07	04:41	0,0	93,8	96,4	90,4	86,0
09.02	04:38	05:13	0,0	92,7	93,5	95,6	80,9
15.02	04:44	04:47	0,0	92,9	95,8	92,0	72,8
02.03	05:27	04:25	0,0	91,7	93,5	93,3	79,0
03.03	05:33	05:06	0,0	91,7	87,6	94,8	73,5
10.03	04:38	04:42	0,0	90,1	94,0	93,4	78,4
12.04	04:20	05:32	0,0	67,3	72,1	69,5	68,2
13.04	04:14	05:26	0,0	61,9	65,0	65,0	63,6
22.04	04:20	03:56	0,0	31,6	31,0	31,8	33,6
03.05	04:14	05:26	36,5	27,1	25,2	40,7	43,3
06.05	04:14	05:26	11,4	17,1	17,5	24,1	27,8

В качестве неприятной особенности данных весны 2005 года следует отметить преимущественно облачную погоду в апреле и мае месяцах. Из отличий бассейнов необходимо указать на большие высоты и меньшую лесистость бассейна Обского водохранилища.

Анализ разностей результатов разных алгоритмов показал, что алгоритмы с использованием *NDSI* (колонки 5, 6) дают близкие результаты, и эти результаты заметно отличаются от результатов алгоритмов на основе альbedo снега в видимом диапазоне (колонки 7, 8). Различие в среднем составляет 5—15%, но иногда достигает 40%. Причины этого уже назвались ранее: высокое альbedo имеет не только снег, но и другие виды объектов, такие как облака, многие виды сухой почвы и скальных пород. И имеющуюся в кадре облачность разные алгоритмы причисляют к разным классам. Если группа алгоритмов на основе альbedo (колонки 7, 8) всегда причисляет облачность к снегу, то группа на основе *NDSI* разные виды облачности причисляет к разным классам.

Таблица 2.6

Средние разности и стандартные отклонения от средних разностей результатов разных алгоритмов по данным *AVHRR* от результатов алгоритма по данным *MODIS*.

Алгоритм	Бассейн Обского вдхр.		Бассейн Красноярского вдхр.	
	Средняя разность	Стандартное отклонение	Средняя разность	Стандартное отклонение
<i>MODIS</i>	-1,3%	2,8%	-0,1%	4,7%
Версия 4	-3,0%	4,4%	7,7%	9,4%
Версия 3	4,6%	11,2%	16,1%	22,1%

В табл. 2.6 приведены средние разности результатов и стандартные отклонения от средних разностей между тремя вариантами алгоритма для данных *AVHRR* и алгоритма для данных *MODIS* (разности между колонкой 5 и колонками 6, 7, 8). Видно чёткое ухудшение совпадения результатов по мере рассмотрения более ранних, несовершенных алгоритмов. Алгоритм версии 3 для данных *AVHRR*, содержащий подбираемый порог по альbedo показал наибольшее расхождение с алгоритмом для данных *MODIS*. Практически можно было добиться совпадения результатов с версией 4 подбором порога, но не лучше. Однако, такой задачи не ставилось, наоборот, была симитирована практика работы с программой «*Snow*» с алгоритмом версии 3 во времена его разработки, по разработанным тогда методикам. Вкратце, методика подбора порогового значения была основана на минимизации чувствительности результатов к значению порога, варьировавшегося в заданных пределах.

Выводы

Проверка качества классификации снега на ~400 снимках трёх бассейнов весны 2005 г. новым алгоритмом показала некоторые отдельные недочёты алгоритма. По результатам проверки были внесены следующие изменения:

- исправлена одна ошибка реализации в виде расхождения с описанием;
- убран лишний пороговый критерий по температуре.

Модификация алгоритма устранила все наблюдавшиеся ошибки классификации снега.

Проверка качества идентификации облачности алгоритмом показала наличие ошибок обоих видов: как ложную облачность, так и пропуск реальной облачности. Для дальнейшего использования алгоритма требуются доработки, а именно:

- тест четвёртой группы на высокую облачность в диапазоне 1,38 мкм должен быть усовершенствован для исключения идентификации ложной облачности в высокогорной местности при сухой погоде;
- требуется дальнейший поиск эффективных методов идентификации облачности, которую пропускают все тесты, используемые в данном алгоритме.

В текущем варианте результаты маскирования облачности могут быть использованы в съёмку с учётом возможных ошибок. В отдельных случаях можно рекомендовать глазомерные поправки к площадям заснеженности, путём причисления ошибочно классифицированной облачности к снегу, если ошибки классификации облачности связаны с обнаружением ложной облачности в высокогорных районах.

Сравнение результатов классификации снега в малооблачные дни по информации КА *Terra* и *NOAA* различными алгоритмами показали, что алгоритмы на основе *NDSI* показывают близкие результаты. По сравнению с алгоритмами на основе альбедо они регистрируют большую часть снега, более устойчивы к изменению условий освещения, состава подстилающей поверхности и наличия следов облачности. Обнаруженные весомые различия в результатах двух групп алгоритмов потребуют оптимизации параметров гидрологических моделей, использующих данные о заснеженности, для использования данных КА *Terra*.

2.4. Совершенствование «Службы мониторинга заснеженности»

Для расширения возможностей обработки данных в области оценки динамики снегового покрытия по данным искусственных спутников Земли «Служба мониторинга заснеженности» [22. 23] была значительно усовершенствована. Существенная переработка архитектуры службы и принципов обработки данных были направлены на решение основных проблем, возникших по мере освоения автоматических алгоритмов обработки информации о заснеженности. Эти проблемы, в основном, заключались в следующем.

Во-первых, архитектура первой версии была основана на единой конфигурации для всех наблюдаемых бассейнов. Данные на все бассейны обрабатывались одинаково, независимо от потребностей в конечных результатах. При этом параметры обработки (например, пороги алгоритмов классификации) также были одинаковы для всех бассейнов. Это приводило и к необходимости перенастраивать службу для опробования разного рода нововведений, и рассчитывать

ненужные результаты. Так, например, чтобы попробовать ввести новый экспериментальный продукт обработки только для одного бассейна, приходилось перемещать все остальные бассейны на время тестирования куда-нибудь, а иначе этот продукт рассчитывался и для них, многократно затягивая время обработки. На время тестирования приходилось прерывать нормальную работу службы по обработке текущих данных, поскольку на одном компьютере можно запускать только один экземпляр службы.

Во-вторых, в первой версии службы существовало однозначное соответствие между рассчитываемыми и показываемыми на информационном сайте результатами. Чтобы ввести новый вид информации или изменить существующий, необходимо было его ввести в службу и в сайт, рассчитать или пересчитать для всех бассейнов, и только тогда он смог бы быть увиденным конечными пользователями. В то же время, иногда требуется лишь изменить вид существующей информации для более наглядного её представления. Например, замена таблицы графиком или диаграммой значительно расширяет диапазон одновременно воспринимаемых человеком данных, при этом преобразование таблицы в график можно выполнять «на лету» — считывая те же табличные данные, но посылая уже графическое изображение. Несмотря на невысокую сложность в реализации этой замены, в первой версии службы этого было сделать нельзя принципиально.

Новая архитектура службы

Для расширения возможностей одновременной параллельной обработки данных в Службе должна поддерживаться более чем одна конфигурация. Это позволило бы на одних и тех же исходных данных параллельно обчислять результаты с разными настройками и сравнивать их регулярно, выбирая наиболее оптимальные варианты параметров классификации, например. Также это позволило бы более экономично расходовать вычислительные ресурсы, например, оставляя экспериментальные продукты только для некоторых и исключая их из большинства бассейнов. Для реализации такого подхода к обработке данных архитектура Службы была основательно переработана.

Во-первых, множественные конфигурации неэффективно хранить по-прежнему — в реестре. Неэффективно в первую очередь из-за сложности управления ими. Реестр не легко редактировать. Для этого есть специальный редактор в ОС Windows, но он не предназначен (т. е. неудобен) для регулярной работы. А вынос всех настроек в диалоги является чрезвычайно затратной процедурой потому, что:

- конфигурационных параметров много и число их только увеличивается;
- конфигураций в службе также много;
- набор конфигурационных параметров в разных конфигурациях различается;

- параметры имеют разные типы и требуют разных способов редактирования;
- многие параметры имеют значения, которые почти никогда не меняются;
- для некоторых параметров требуется возможность возврата значений по умолчанию;
- для многих параметров желательно наличие истории изменений;
- для некоторых параметров желателен список наиболее употребительных значений;
- смысл параметров в диалогах подсказывать сложно и неудобно;
- поиск в диалогах определённого параметра возможен только перебором всех;
- желательна возможность документирования причин выбора значения параметра.

Такое большое количество требований чрезвычайно усложняет и запутывает реализацию диалогов. Фактически, прежняя реализация диалогов уже была чрезмерно сложной. Так, например, часто сам разработчик не помнил, на каком диалоге находится нужный ему параметр. Введение же множественных конфигураций в прежнем виде стало бы сущим кошмаром для пользователя. Поэтому система конфигурации службы была полностью изменена.

В новой версии «Службы мониторинга заснеженности» вся конфигурационная информация записана в текстовых файлах в формате, аналогичном *INI*-файлам. Для реализации желательной функциональности в формат были добавлены две возможности:

- возможность включать в файл другие файлы конфигураций;
- возможность добавлять комментарии.

Первая возможность позволяет упростить конфигурацию путём выноса редко меняющейся информации в отдельные файлы. Вторая же возможность позволяет реализовать практически всю остальную желательную функциональность. С помощью комментариев реализуются и значения по умолчанию, и описания смысла параметров, и история изменений, и списки наиболее употребительных значений. Поиск слов в тексте есть в любом редакторе. Также следует отметить, что текстовая конфигурация пригодна в качестве документа для систем управления изменениями вроде *CVS* или *Microsoft Visual SourceSafe*.

Во-вторых, ядро обработки службы, основанное на алгоритме «портфеля задач» было переработано для более полного параллелизма обработки данных. Если в прежней версии службы задания одного бассейна выполнялись только последовательно, а для разных бассейнов могли выполняться параллельно, то теперь и задания одного бассейна могут выполняться параллельно, если, конечно, есть все необходимые для этого исходные данные. Разумеется, задания разных конфигураций также могут обрабатываться параллельно.

В-третьих, для возможности построения текстовых отчётов и графиков за год были введены новые промежуточные продукты, в которых накапливаются данные о заснеженности за год.

Для экономии места и времени обработки они были реализованы в бинарном виде и упаковываются по алгоритму *GZIP*.

Новый вид пользовательского интерфейса

Пользовательский интерфейс службы был значительно сокращён. Из-за переноса всех настроек в конфигурационные файлы в интерфейсе пользователя осталось два диалога — диалог регистрации и удаления службы и диалог выбора и быстрого редактирования конфигурационных файлов.

Кнопки раздела «Регистрация и удаление службы» (рис. 2.13), соответственно, регистрируют службу в базе данных менеджера управления службами (*Service Control Manager, SCM*) и удаляют регистрацию из базы данных. В разделе «Подробность сообщений» настраивается детальностью сообщений службы. В программу заложены следующие пять уровней подробности:

1. Ошибки — регистрируются только серьёзные ошибки.
2. Предупреждения — регистрируются также менее серьёзные ошибки.
3. Успех завершения обработки — регистрируется окончание обработки плана.
4. Успех завершения операции — регистрируется окончание каждой существенной операции при выполнении плана.
5. Успех каждого действия — регистрируются все сообщения.

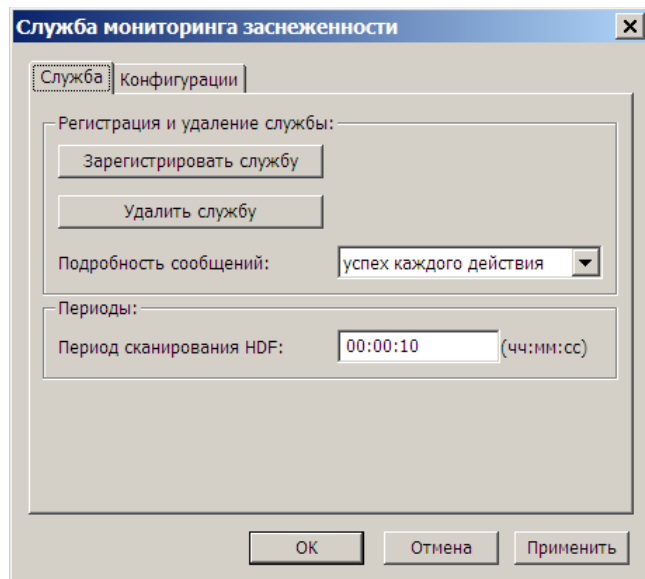


Рис. 2.13 Диалог регистрации и удаления службы.

В разделе «Периоды» настраивается период просмотра каталога данных *MODIS*. Каталог данных *MODIS* просматривается с периодичностью не меньше указываемого там периода. При обнаружении новой группы *HDF*-файлов начинается их обработка, и следующий просмотр каталога откладывается до её окончания. Иначе может возникнуть ситуация, когда обработку потребуется прервать и начать заново — из-за новой группы *HDF*-файлов. Поэтому период задаёт

минимальный промежуток времени между просмотрами, а максимальный определяется временем обработки одной группы файлов *HDF*.

Диалог конфигурационных файлов (рис. 2.14) позволяет указать их местонахождения, с одной стороны, и открывать конфигурационные файлы для редактирования, с другой стороны. В верхней части диалога указывается каталог конфигурационных файлов. Все они и только они в этом каталоге должны иметь расширение «*CFG*». Допускается наличие в нём файлов с другими расширениями.

Каждый конфигурационный файл задаёт параметры одной линейки продуктов — то есть один конфигурационный файл эквивалентен всем настройкам службы предыдущей версии. Таких конфигурационных файлов может быть любое число. Единственное, за чем необходимо следить — так это за независимостью конфигураций. Если в двух конфигурациях будут указаны одинаковые каталоги для результатов, и будет хотя бы один одинаковый бассейн, то результаты работы службы будут непредсказуемы. В службе ведётся параллельная обработка данных, и это может привести к одновременному расчёту одного и того же результата и вызвать взаимную блокировку при его сохранении.

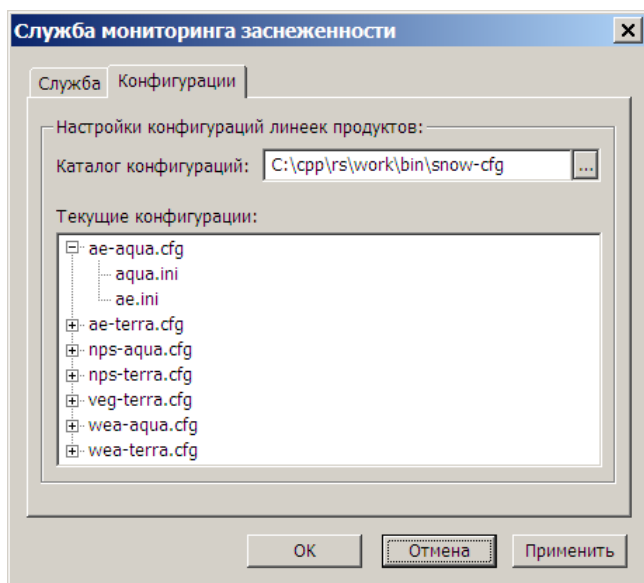


Рис. 2.14 Диалог конфигурационных файлов.

В нижней части диалога показано дерево конфигурационных файлов. Помимо самих файлов, которые представлены узлами дерева первого уровня, в узлах следующих уровней представлены включаемые файлы. Двойной щелчок левой кнопки мыши по узлу приводит к открытию конфигурационного файла для редактирования. Файл для редактирования открывается в редакторе, сопоставленном ему во множестве типов файлов в «Проводнике» ОС *Windows*. Это позволяет настраивать редактор по предпочтению пользователя. По умолчанию используется встроенный редактор ОС *Windows Notepad*.

Информационный сайт службы мониторинга заснеженности

В информационный сайт службы мониторинга заснеженности были внесены изменения, направленные на повышение информативности представляемой информации:

Во-первых, добавлены полные названия бассейнов рек вместо трёхбуквенных аббревиатур. Это исправление значительно улучшило внешний вид страниц (рис. 1.3). Для реализации этого исправления пришлось добавить специальный продукт, не зависящий ни от бассейнов, ни от времени, в связи с чем пришлось добавить в архитектуру новый класс результатов, которые хранятся в единственном файле!

Во-вторых, в список отображаемых результатов были добавлены витковые продукты, а именно:

- обзорное изображение витка,
- картосхема результата классификации витка,
- таблица заснеженности по данным витка,
- средняя высота кромки снега по данным витка

Содержимое страниц с этими продуктами аналогично таковому для данных за сутки кроме обзорного изображения, которого для суточных данных нет (рис. 1.3). Для выбора витка среди всех витков за сутки в левую часть навигации была добавлена строка с временами пролёта всех витков за сутки (см. рис. 2.15).

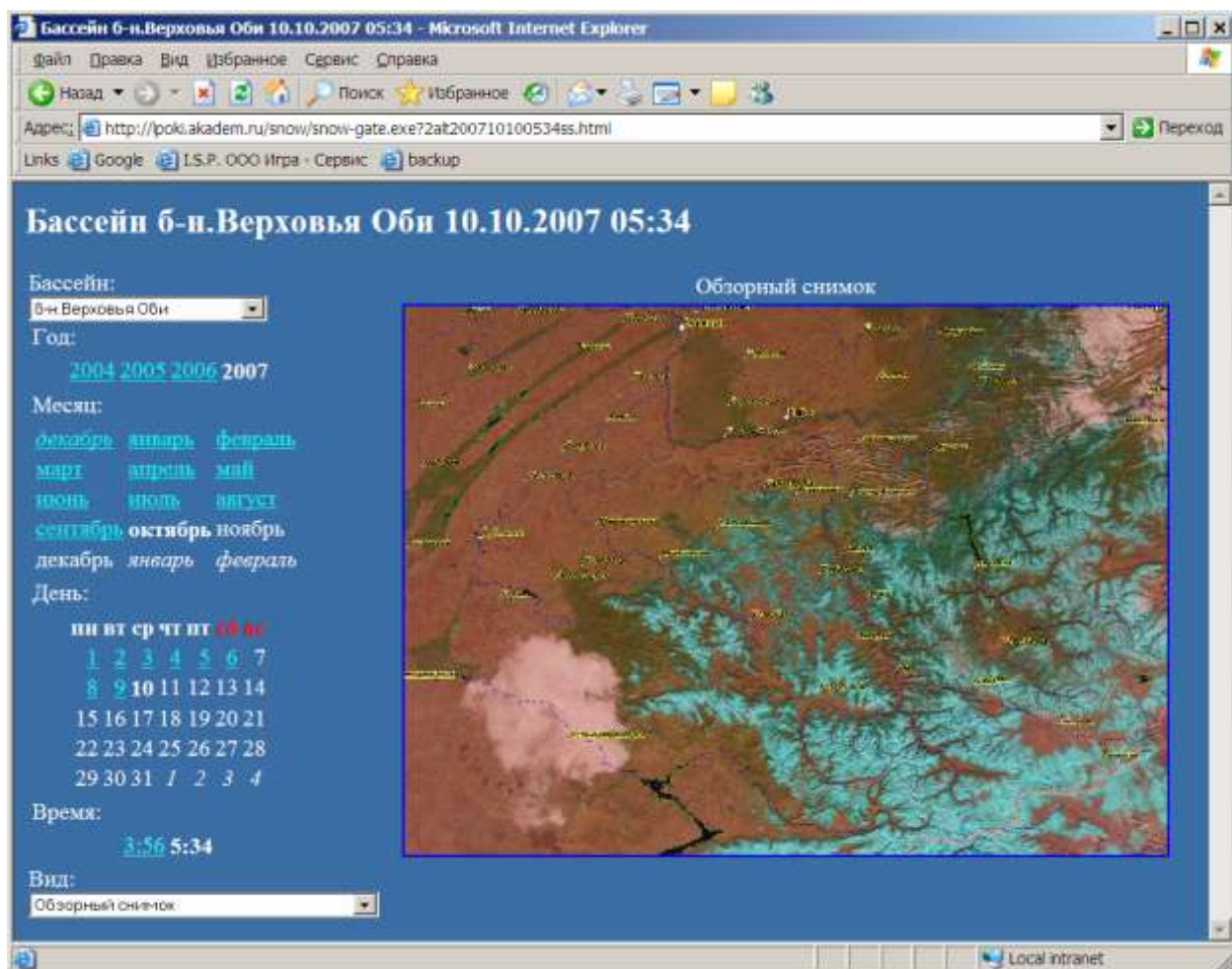


Рис. 2.15 Страница представления обзорного снимка витка. Бассейн Обского вдхр. 10 октября 2007 года 05:43 UTC.

В-третьих, были разработаны новые продукты, которые не рассчитываются заблаговременно службой, а создаются «на лету», во время обработки запроса на Веб-сервере. Такими продуктами являются данные за целый год или несколько лет, а именно:

- График 16-суточной заснеженности за год.
- График многолетней заснеженности.
- Безоблачная витковая заснеженность.

Эти результаты рассчитываются «на лету» при обработке запроса из предназначенных для этого двух новых промежуточного продуктов, т. н. двоичных таблиц заснеженности витка, 16-суточного композита, а также их сборки за год и весь период наблюдений. График 16-суточной заснеженности за год показывает динамику изменения заснеженности территории за один год. Помимо собственно оценки заснеженности, даётся оценка остаточной облачности и неустойчивости классификации за последние 16 суток (рис. 2.16).

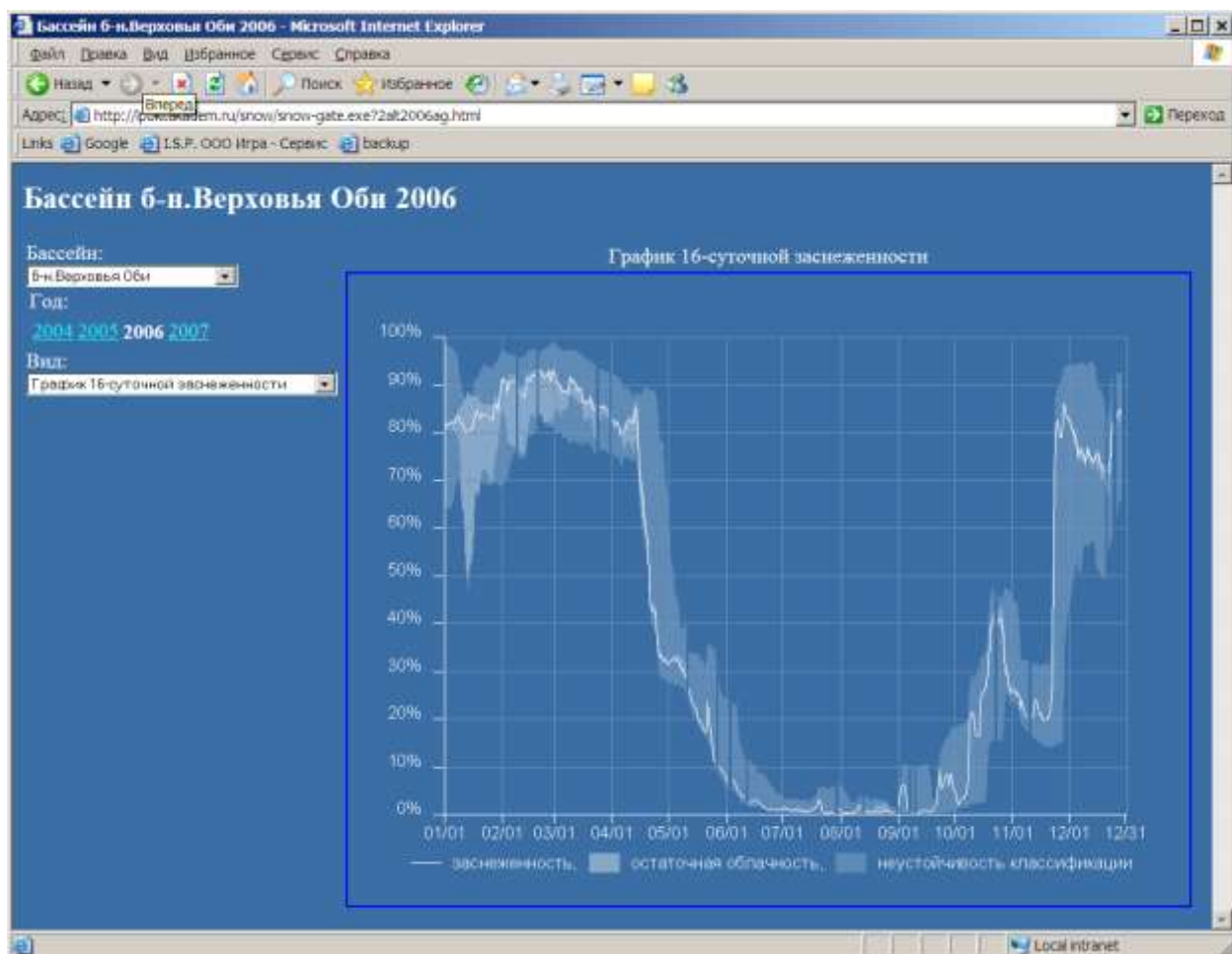


Рис. 2.16 Страница представления графика 16-суточной заснеженности бассейна Обского вдхр. за 2006 год.

График многолетней заснеженности представляет собой аналитический продукт, предназначенный для оценки общей динамики заснеженности текущего года по сравнению с прошлым годом и всеми наблюдениями вообще (рис. 2.17). На нём представлены пять разных зависимостей (две из них даны в виде области):

- оценка заснеженности за текущий год,
- оценка заснеженности за прошлый год,
- оценки заснеженности за все другие годы наблюдений,
- область наблюдавшихся за все годы значений.

Такой набор информации был выбран из соображений масштабируемости. Если бы каждый год наблюдений был представлен отдельным графиком, то с увеличением количества лет наблюдения легенда выросла бы до невообразимых размеров, и разобрать что-либо на графике уже не удалось бы. Для точной идентификации года с наибольшим или наименьшим значением заснеженности какого-то периода можно использовать описанный выше график 16-суточной заснеженности за год, пролистав все годы.

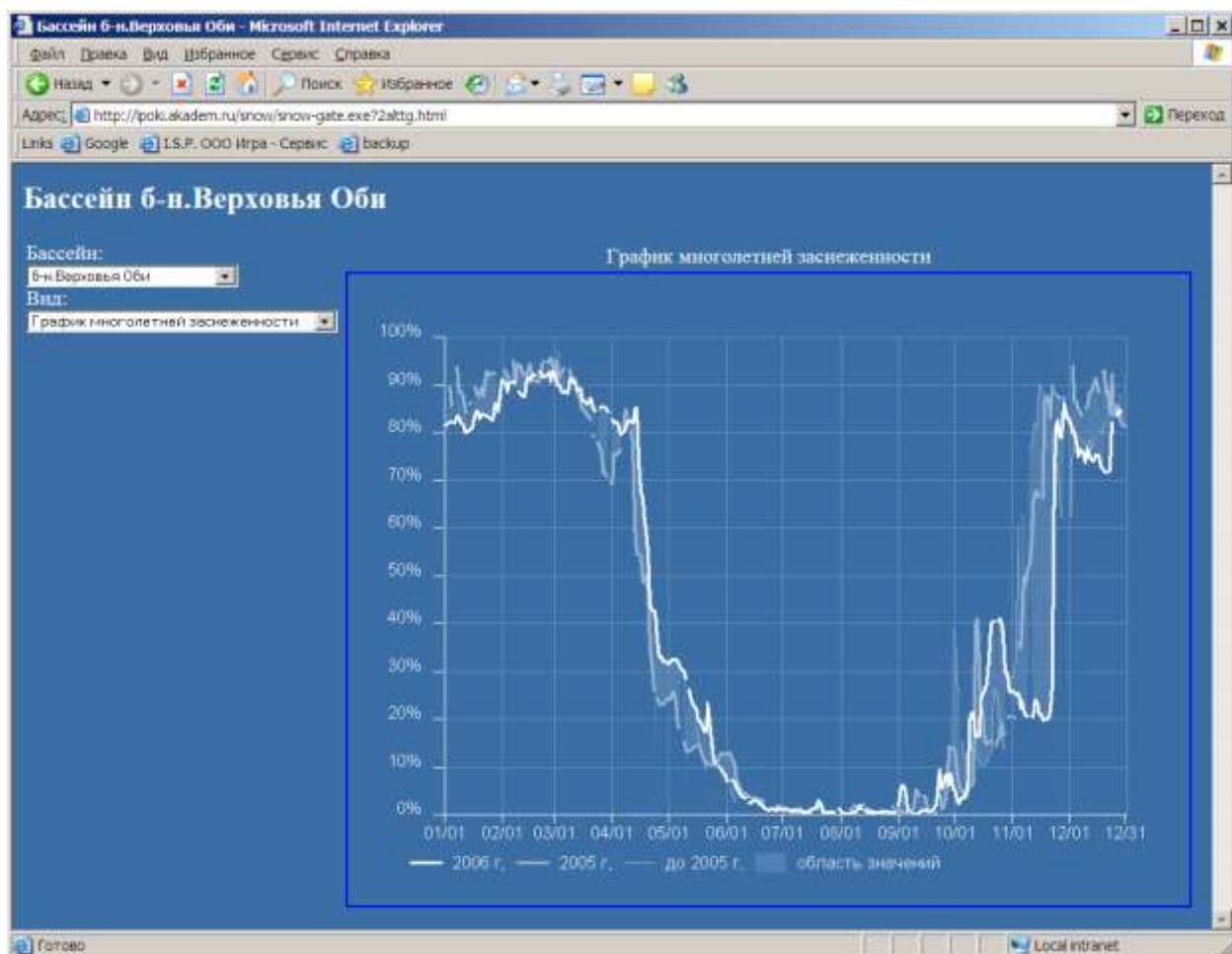


Рис. 2.17 Страница представления графика многолетней заснеженности бассейна Обского вдхр.

Таблица безоблачной витковой заснеженности была добавлена как один из основных продуктов системы, необходимый для совершенствования гидрологических моделей формирования весеннего стока. Если ранее данные безоблачных витков отбирались вручную, а в прошлом году — по формальному критерию, то с 2007 года таблица безоблачной витковой заснеженности за весь год до текущей даты доступна с информационного сайта Службы мониторинга заснеженности.

Выводы

Усовершенствования Службы мониторинга заснеженности, внесённые как в расчётный модуль, так и в Информационный сайт службы привели к качественному скачку в обработке и представлении информации, касающейся мониторинга динамики заснеженности речных бассейнов. В современном состоянии Служба является пригодной для оптимизации многочисленных настроек методов классификации снега или облачности путём вариации параметров и последующем сравнении результатов с целью выбора наиболее оптимальных их значений. Информационный сайт службы мониторинга заснеженности предоставляет целый спектр видов пространственной, графической и табличной информации, как детальной, так обобщённой ана-

литической. Фактически в настоящее время на информационном сайте постоянно доступна та информация, которая ранее делалась специально для включения в отчёт за год. Таким образом, реализована полностью автоматическая система мониторинга площадей заснеженности речных бассейнов, предоставляющая данные со всех этапов обработки, а также аналитические отчётные данные, в том числе и многолетние.

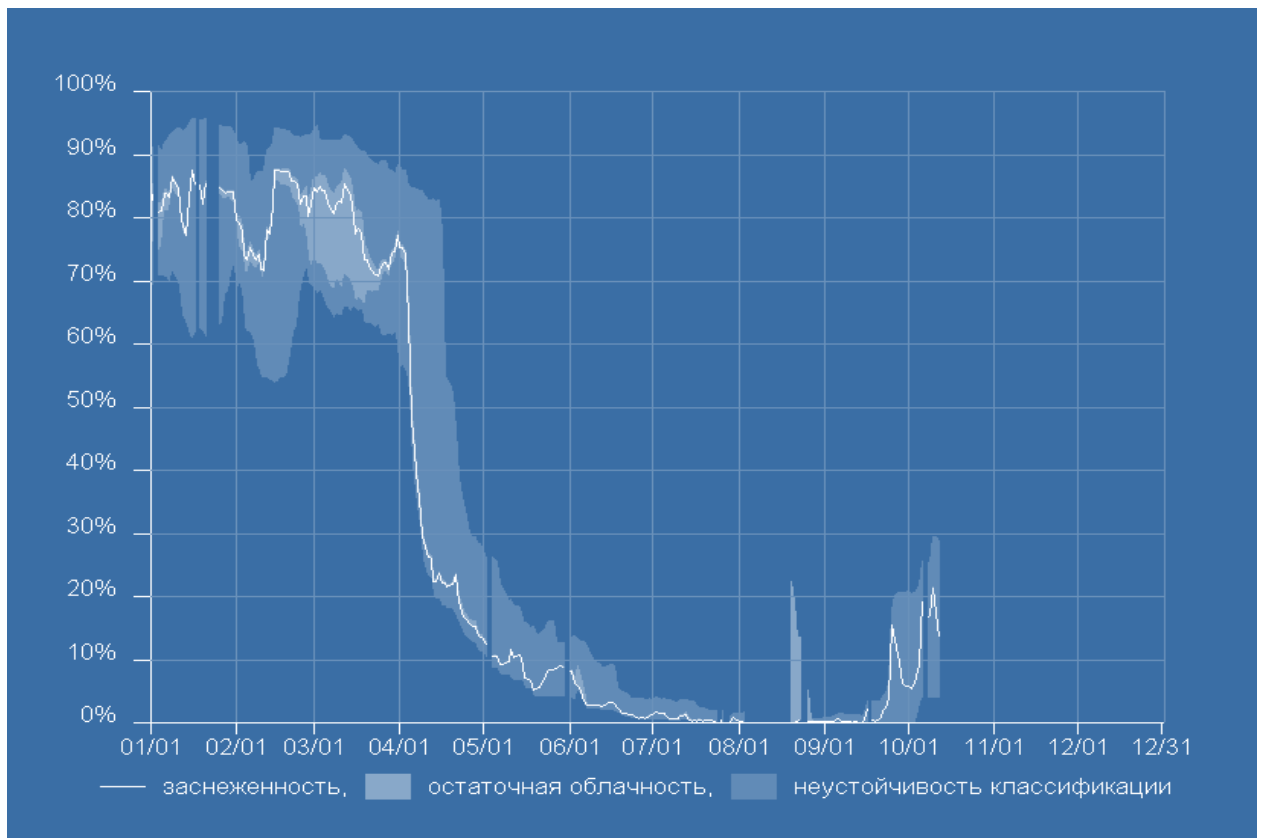
2.5. Динамика заснеженности районов и высотных зон бассейнов Обского, Красноярского и Саяно-Шушенского водохранилищ в 2004—2006 гг.

Динамика заснеженности бассейнов Обского, Красноярского и Саяно-Шушенского водохранилищ является одним из основных результатов данного исследования. Она имеет научную ценность как сама по себе, так и в качестве исходных данных для другой части данной работы, посвящённой совершенствованию гидрологических модели формирования весеннего стока.

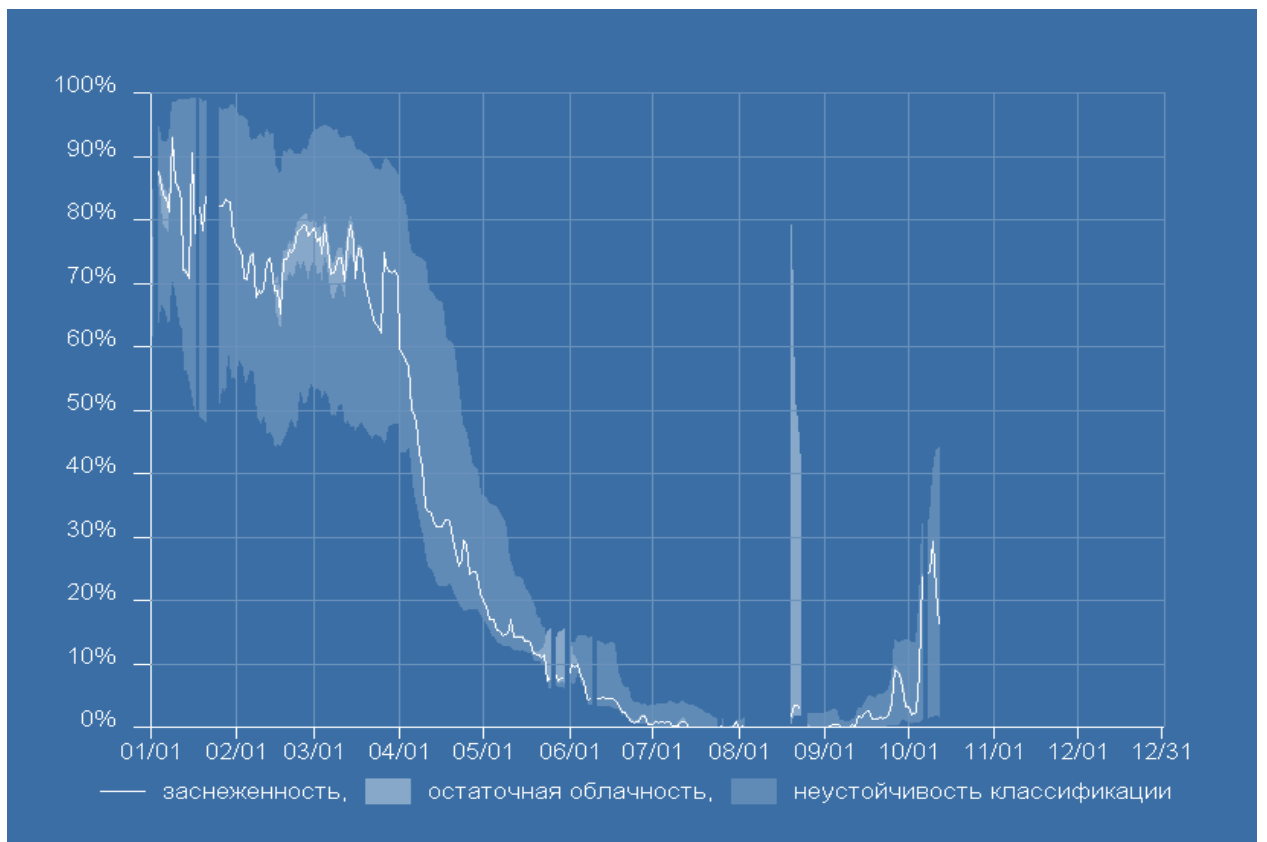
Последние усовершенствования службы мониторинга заснеженности завершили процесс полной автоматизации обработки. В отличие от прошлых лет, результаты для совершенствования гидрологических моделей формирования весеннего стока теперь формируются в процессе обработки ежедневно и доступны в любой момент времени. Также и аналитические материалы за год и за весь период наблюдения.

Динамика заснеженности бассейнов

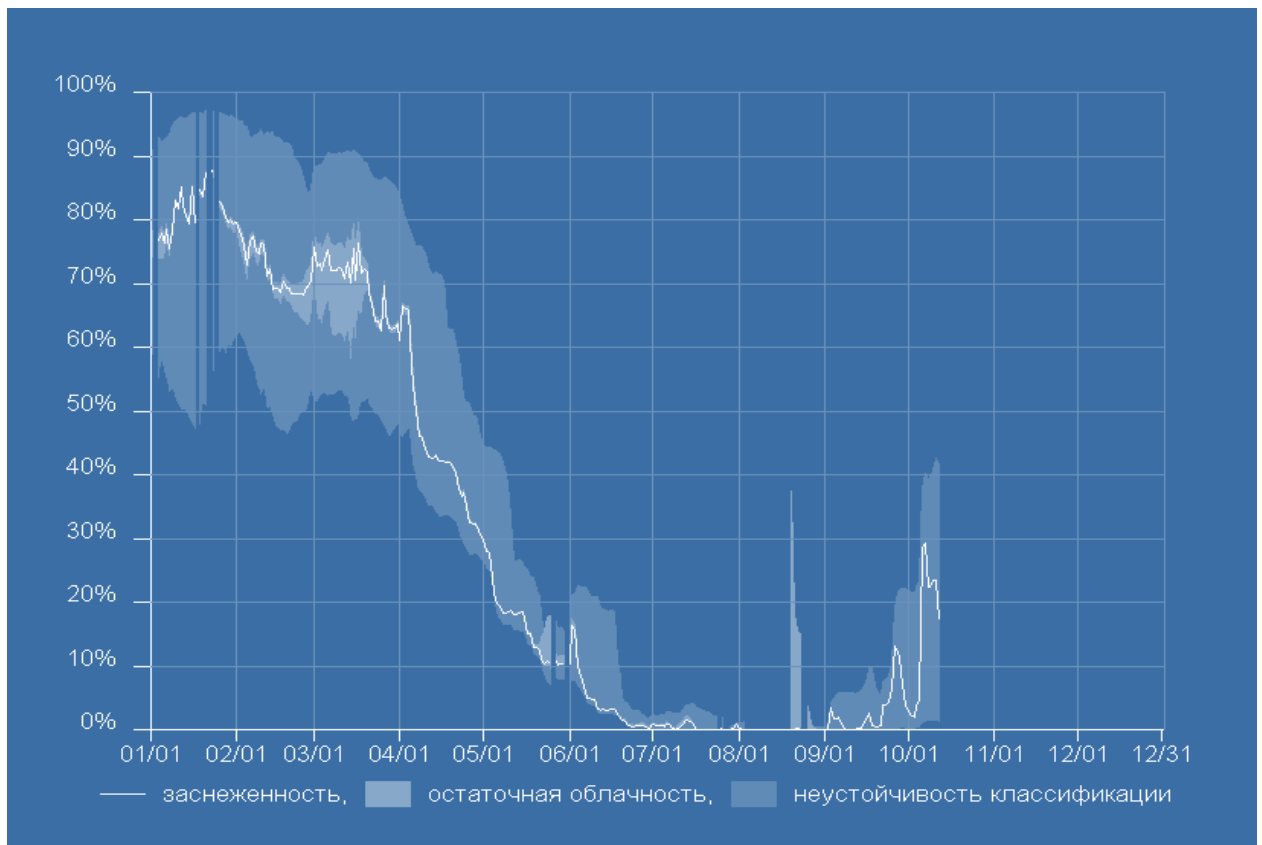
На рис. 2.18 приведена динамика изменения заснеженности бассейнов водохранилищ за 2007 год. Помимо собственно средней заснеженности также приведены границы оценок заснеженности с учётом наличия остаточной облачности и неустойчивости алгоритмов классификации. Следует напомнить, что учёт остаточной облачности делается путём причисления её к классам «снега» и «не снега».



а) бассейн Обского вдхр.



б) бассейн Красноярского вдхр.



в) бассейн Саяно-Шушенского вдхр.

Рис. 2.18. Оценки динамики заснеженности бассейнов водохранилищ по данным 16-суточных композитов за 2007 год.

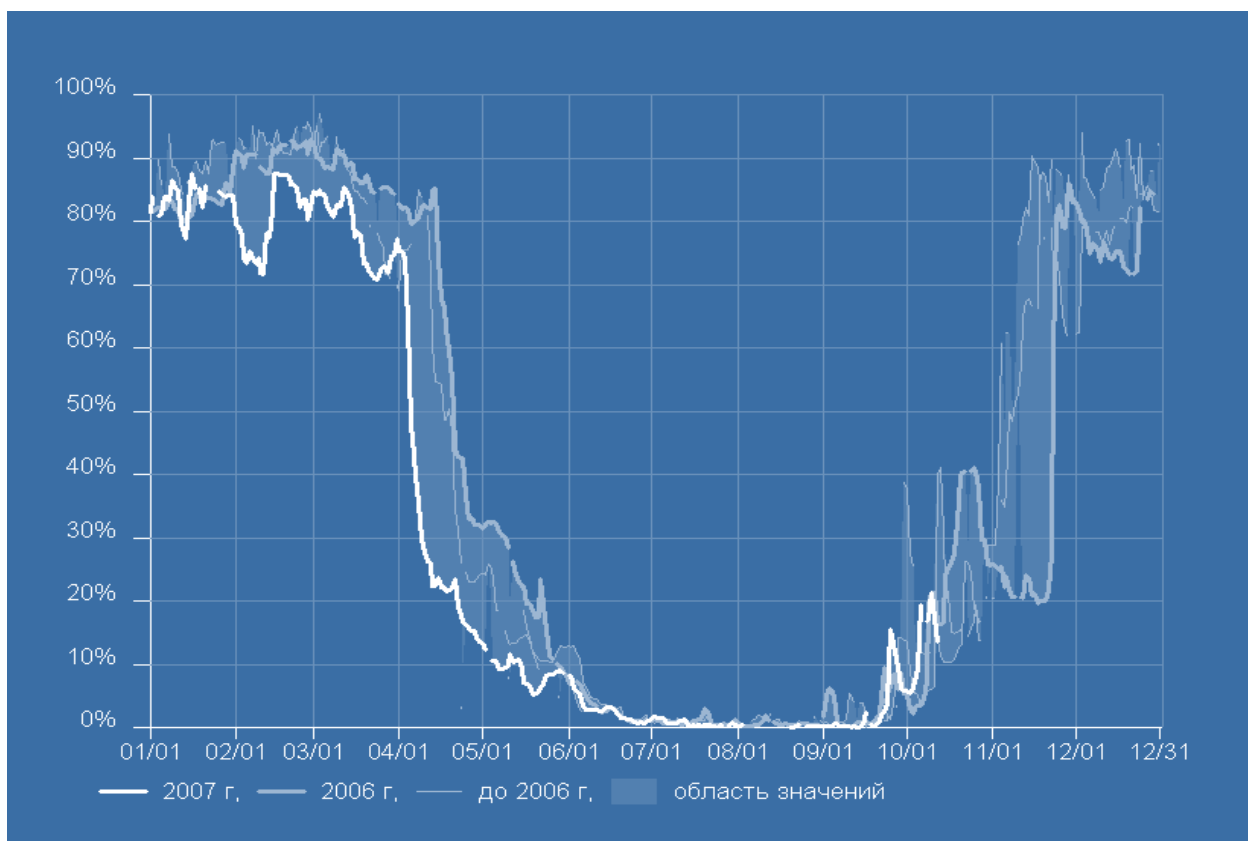
На приведённых графиках отображаются две области и две кривых. Тёмным тоном нарисована область оценок заснеженности по разным алгоритмам композиции. Более светлым тоном внутри тёмной области нарисована область оценок с учётом остаточной облачности. Линией нарисована кривая оценки заснеженности. Область оценок с учётом остаточной облачности не всегда лежит внутри области алгоритмов композиции, но на данных графиках этого не видно. Эти графики взяты с информационного сайта Службы мониторинга заснеженности, где они доступны в любое время.

Общий характер кривых, показанных на рис. 2.18, как и в прежние годы, представлен несколькими составляющими. Прежде всего, наибольшую амплитуду имеет сезонный цикл. Зимний максимум, смещённый к началу весны из-за увеличения высоты Солнца, сменяется весенним склоном таяния, затем — летним минимумом, а потом осенним ступенчатым установлением снежного покрова.

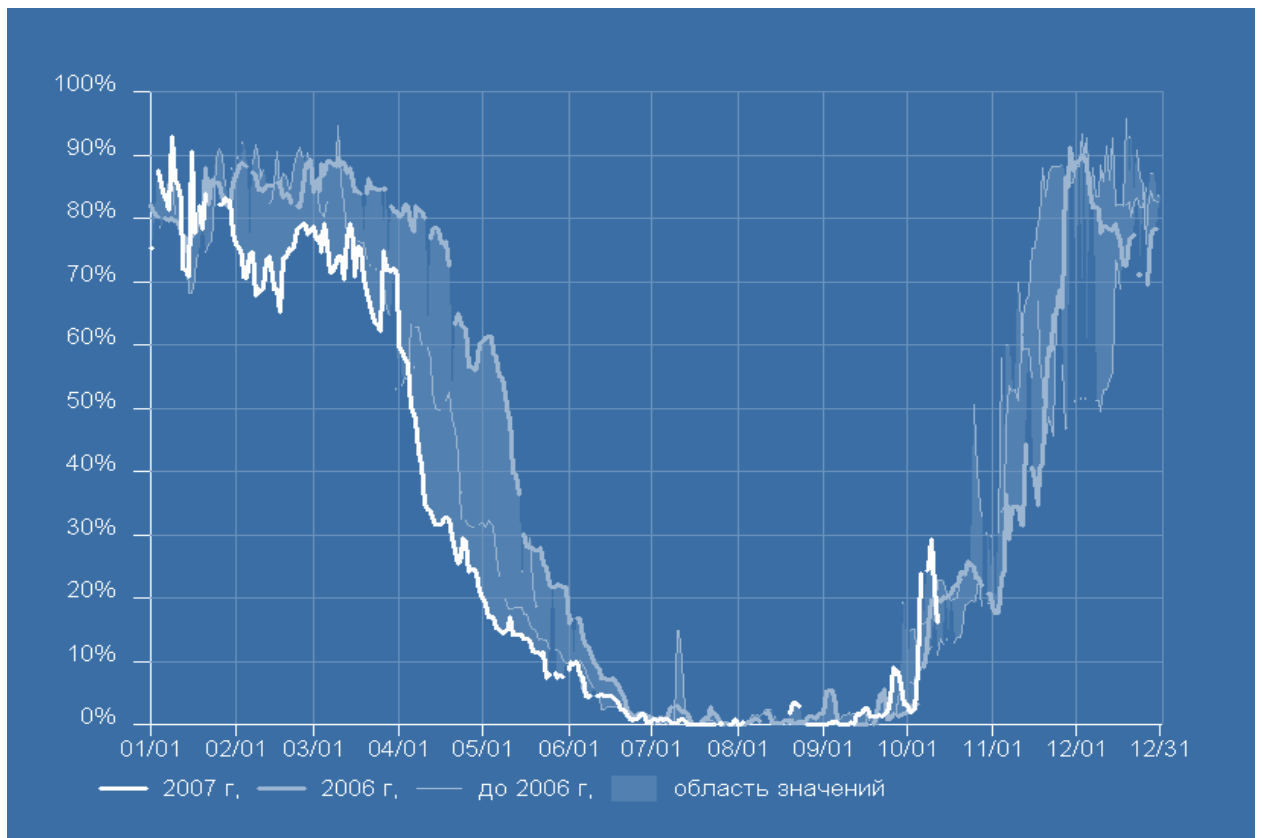
Второй по амплитуде составляющей годового цикла заснеженности являются нерегулярные осцилляции с периодом в несколько суток. Они обусловлены погодными явлениями, в первую очередь выпадением твёрдых осадков, а также колебаниями температуры воздуха. Выпадения твёрдых осадков имеют форму остrokонечных импульсов и особенно заметны весной и

осенью, при средних площадях заснеженности. Покрывая землю и следом растаивая полностью или частично, они и формируют эти импульсы. В 2007 году они с большой амплитудой наблюдались ещё и зимой. В 2007 году зима была рекордно тёплой за весь период наблюдений, поэтому зимние оттепели приводили к снижению площадей заснеженности и, как следствие, возможности появления её положительной динамики при выпадениях снега. Это привело к отсутствию чёткого максимума в начале марта в динамике всех бассейнов. Также максимальная зимняя заснеженность оказалась меньше таковой в другие годы.

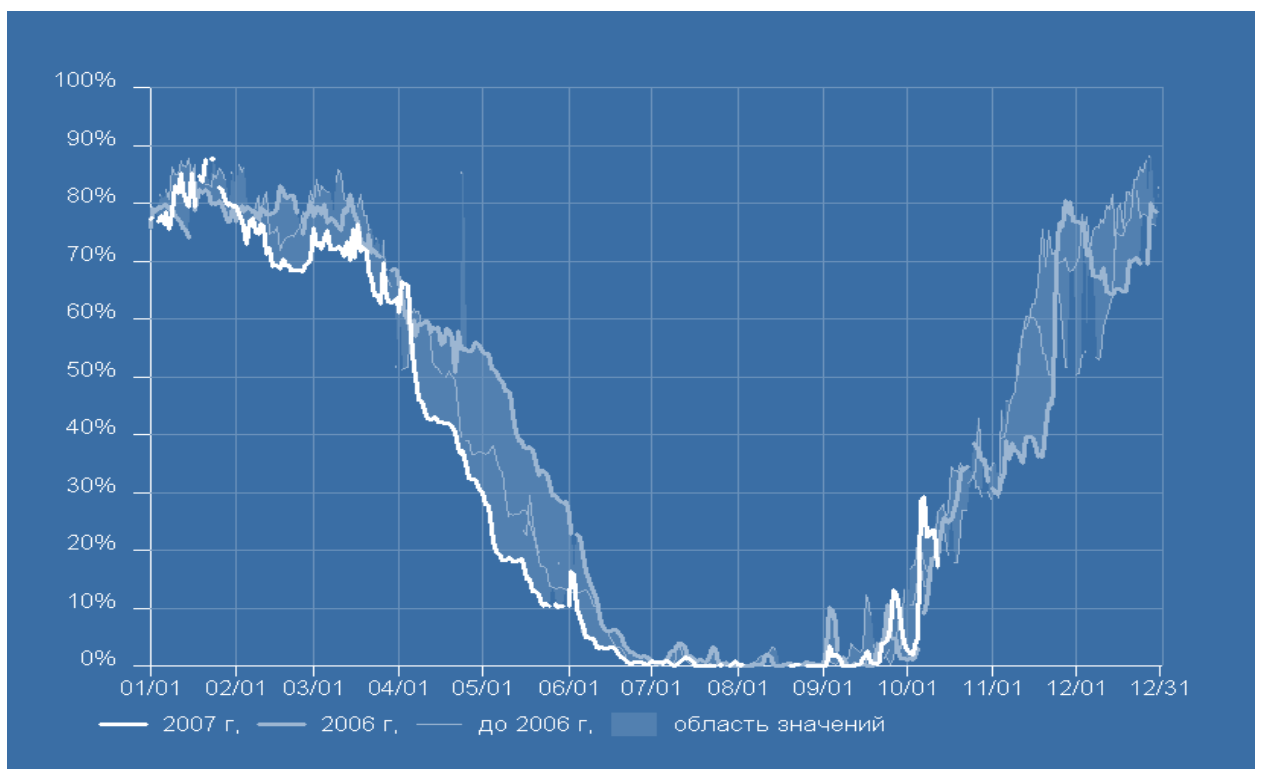
Летний период представляет собой годовой минимум заснеженности речных бассейнов. Небольшие осцилляции в летний период минимума вызваны ошибками классификации облачности, которые следом приводят к ошибкам классификации снега над облаками, которые могут состоять из кристалликов льда. В 2007 году в летних наблюдениях образовался вынужденный перерыв в две недели с 3 до 18 августа, вызванный выходом из строя передающей аппаратуры спутника *Terra*. Поломка была устранена специалистами *NASA* в течение двух недель, и сбор данных возобновился.



а) бассейн Обского водохранилища.



б) бассейн Красноярского вдхр.



в) бассейн Саяно-Шушенского вдхр.

Рис. 2.19 Сравнение динамики заснеженности разных лет по данным 16-суточных композитов.

Для сравнения динамики изменения заснеженности за разные годы на рис. 2.19 приведены многолетние графики заснеженности речных бассейнов. Эти графики также взяты с информационного сайта Службы мониторинга заснеженности, где они доступны в любое время. На них показаны данные последнего года, предпоследнего года и остальных лет с закраской области наблюдавшихся значений.

Как видно из графиков многолетней заснеженности, в 2007 году весна была ранней. По сравнению с 2006 годом одинаковые площади заснеженности были достигнуты в 2007 году, в среднем, на месяц раньше! Однако, учитывая, что 2006 году весна была запоздалой, то следует признать примерно двухнедельное опережение средней многолетней динамики.

Особенно сильные различия наблюдаются в случае Красноярского водохранилища, где и максимальная зимняя заснеженность наблюдалась значительно меньшей, и опережение схода снега держалось на уровне месяца вплоть до июня.

А вот в бассейне Саяно-Шушенского водохранилища зимние уровни заснеженности были близки к средним многолетним, а последняя декада марта и вовсе не отличалась от средней многолетней. Но первая декада апреля разом вызвала опережение на 40 дней, и только холодный май привёл к уменьшению опережения до одной недели.

В бассейне Обского водохранилища максимальная зимняя заснеженность также была ниже средней многолетней. Из-за обычных высоких темпов схода снега тепло первой декады апреля вызвало лишь двухнедельное опережение схода снега. Скорость уменьшения площадей заснеженности была традиционно высокой, но холодный май ввёл процесс в обычное русло к началу июня.

Оценивая многолетнюю динамику площадей заснеженности трёх бассейнов в целом за период с 2005 года следует отметить, что 2007 год является годом минимальной заснеженности, тогда как 2006 год, наоборот — год максимальной наблюдавшейся заснеженности для всех бассейнов.

Динамика заснеженности бассейнов для оптимизации параметров гидрологических моделей

В табл. 2.7—2.9 приведены полученные результаты оценок относительной заснеженности бассейнов Обского, Красноярского и Саяно-Шушенского водохранилищ в целом. В табл. 2.10—2.14 приведены результаты оценок средней высоты границы снега и заснеженности по районам этих бассейнов.

Таблица 2.7

Оценки относительной заснеженности бассейна Обского водохранилища за 2007 г при доле облачности менее 30%.

Дата и время (UTC)	Оценка заснеженности, %	Оценка заснеженности без учёта облачности, %
08.01 05:03	81.54	80.80
15.01 05:13	83.90	81.60
16.01 05:52	81.42	81.94
01.04 05:34	71.99	75.85
05.04 05:09	43.55	48.55
06.04 05:55	40.67	38.36
09.04 04:45	19.10	19.86
13.04 05:58	11.99	16.49
16.04 04:51	13.93	23.05
21.04 05:09	14.19	23.95
21.04 05:52	8.46	18.80
23.04 04:57	10.03	17.99
24.04 05:40	13.60	17.31
04.05 04:39	8.96	8.78
19.05 05:34	5.44	5.17
21.06 05:21	1.43	3.44
23.06 06:04	1.31	1.13
27.06 05:40	0.97	1.10

Таблица 2.8

Оценки относительной заснеженности бассейна Красноярского водохранилища за 2007 г при доле облачности менее 5%.

Дата и время (UTC)	Оценка заснеженности, %	Оценка заснеженности без учёта облачности, %
09.01 05:46	84.37	81.54
06.04 04:14	41.80	41.99
06.04 05:55	38.19	38.34
21.04 04:14	21.13	24.34
21.04 05:52	17.30	19.49
23.04 04:57	24.46	26.57
24.04 05:40	23.97	23.91

Таблица 2.9

Оценки относительной заснеженности бассейна Красноярского водохранилища за 2007 г при доле облачности менее 30%.

Дата и время (UTC)	Оценка заснеженности, %	Оценка заснеженности без учёта облачности, %
04.01 05:27	87.99	83.12
09.01 04:08	86.36	81.96
16.01 04:14	84.02	80.15
16.01 05:52	81.03	81.12
17.01 04:57	75.99	68.75
21.01 04:33	81.30	78.74

30.01 04:27	77.85	75.99
15.03 04:51	77.94	75.20
19.03 04:27	67.39	61.25
01.04 05:34	51.15	51.88
07.04 04:57	49.34	46.84
10.04 05:28	24.62	25.89
11.04 04:33	29.65	26.78
14.04 05:03	24.90	31.71
21.04 05:09	15.57	19.07
04.05 04:39	8.41	17.21
11.05 05:28	1.69	5.19
01.06 04:08	6.95	7.70
01.06 05:46	6.91	8.86
07.06 04:26	4.52	4.97
23.06 04:26	0.56	0.47
24.06 05:09	0.26	0.58

Таблица 2.10

Оценки относительной заснеженности бассейна Саяно-Шушенского водохранилища за 2007 г при доле облачности менее 30%.

Дата и время (UTC)	Оценка заснеженности, %	Оценка заснеженности без учёта облачности, %
16.01 04:14	83.64	78.67
17.01 04:57	79.15	77.62
30.01 04:27	79.94	73.22
06.02 04:33	76.70	75.65
06.04 04:14	47.58	49.69
07.04 04:57	48.15	50.55
08.04 04:02	38.71	41.21
21.04 04:14	30.61	34.58
23.04 04:57	31.33	37.01
24.04 04:02	30.24	33.78
25.04 04:45	31.07	34.70
26.04 05:28	28.95	29.12
04.05 04:39	10.15	21.81
27.05 04:45	11.61	16.66

Таблица 2.11

Оценки высоты границы снега и относительной заснеженности районов бассейна Обского водохранилища за 2007 год.

Дата	Время	Объём выборки	Число граничащих с облаком	Средняя высота, м	Среднеквадратичное отклонение, м	Оценка заснеженности
р-н.Бия-1						
15.01.2007	5:13	24861	58	987	526	79,97%
16.01.2007	5:52	15544	12	1044	487	78,06%

06.04.2007	5:55	18107	63	799	504	57,30%
24.04.2007	5:40	7673	107	1764	354	15,04%
04.05.2007	4:39	4560	0	1972	340	6,52%
07.06.2007	4:26	419	0	2328	210	0,53%
р-н.Бия-2						
29.04.2007	4:20	7015	208	2272	308	27,83%
29.04.2007	5:58	8322	83	2239	293	29,04%
04.05.2007	4:39	7320	114	2351	268	18,50%
19.05.2007	5:34	4589	0	2500	256	8,03%
р-н.Катунь-1						
15.01.2007	5:13	20722	583	1035	447	75,42%
16.01.2007	5:52	16247	192	1038	432	70,42%
19.03.2007	4:27	6042	70	880	511	47,90%
05.04.2007	5:09	10119	153	915	556	33,01%
06.04.2007	5:55	6262	54	987	618	25,80%
09.04.2007	4:45	3286	42	1480	494	13,14%
16.04.2007	4:51	2433	109	1712	184	12,00%
24.04.2007	5:40	2758	34	1810	176	9,38%
04.05.2007	4:39	2209	0	1953	186	4,13%
04.05.2007	6:17	1807	16	1860	191	5,79%
19.05.2007	5:34	1147	0	2058	180	1,49%
07.06.2007	4:26	14	0	2375	110	0,02%
21.06.2007	5:21	4	5	2211	111	0,01%
р-н.Катунь-2						
04.05.2007	4:39	14096	264	2217	405	22,65%
11.05.2007	4:45	11306	1041	2173	456	29,14%
19.05.2007	5:34	13552	198	2366	432	15,89%
23.06.2007	6:04	4367	17	2729	353	5,72%
р-н.Катунь-3						
16.05.2007	5:03	3823	124	2761	254	11,22%
19.05.2007	5:34	2830	66	2772	270	7,83%
18.06.2007	5:47	1809	27	2890	248	4,63%
р-н.Песчаная						
15.01.2007	5:13	11827	489	940	385	83,42%
16.01.2007	5:52	10295	201	978	368	81,99%
21.01.2007	6:17	8397	54	957	387	82,14%
31.03.2007	4:51	9852	381	880	413	87,56%
31.03.2007	6:29	8149	14	623	403	62,22%
05.04.2007	5:09	6299	16	998	332	11,11%
09.04.2007	4:45	954	0	1274	301	2,23%
13.04.2007	5:58	690	8	1429	239	1,40%
16.04.2007	6:29	454	0	1524	181	1,16%
21.04.2007	5:09	2058	24	1438	138	4,83%
21.04.2007	5:52	400	49	1542	131	0,80%
23.04.2007	4:57	407	10	1594	152	0,69%
24.04.2007	5:40	308	48	1640	157	0,55%
04.05.2007	4:39	39	0	1671	188	0,04%
04.05.2007	6:17	22	0	1601	170	0,02%
р-н.Чарыш-1						
08.01.2007	5:03	7412	295	872	396	93,19%

15.01.2007	5:13	9229	122	792	406	92,45%
16.01.2007	5:52	9497	159	842	364	91,43%
17.03.2007	6:17	8381	224	691	348	86,82%
31.03.2007	6:29	3655	9	630	360	92,51%
05.04.2007	5:09	7452	9	717	305	20,70%
13.04.2007	5:58	2409	101	1040	345	6,21%
21.04.2007	5:09	1918	41	1137	318	5,57%
21.04.2007	5:52	1522	102	1216	298	4,01%
23.04.2007	4:57	1803	6	1320	349	5,18%
23.04.2007	6:35	1070	3	1379	293	4,70%
24.04.2007	5:40	1810	95	1314	345	5,10%
04.05.2007	4:39	1112	0	1493	285	2,58%
19.05.2007	5:34	989	47	1580	263	1,30%
23.06.2007	6:04	10	0	1658	131	0,01%
27.06.2007	5:40	9	0	1675	200	0,01%
р-н.Чарыш-2						
06.04.2007	5:55	1678	54	1462	214	44,94%
16.04.2007	6:29	1282	0	1644	243	36,59%
24.04.2007	5:40	2104	74	1732	227	29,34%
26.04.2007	5:28	2185	197	1762	246	26,73%
04.05.2007	4:39	1446	0	1818	215	16,56%
04.05.2007	6:17	1539	0	1803	233	17,49%
19.05.2007	5:34	1640	30	1856	209	9,52%
21.06.2007	5:21	204	77	1611	182	0,03%
23.06.2007	6:04	14	0	1801	101	0,05%
р-н.Алей						
15.01.2007	5:13	13484	201	202	69	95,75%
03.03.2007	6:05	1874	7	209	75	99,39%
13.03.2007	5:03	2317	78	186	45	99,39%
17.03.2007	4:39	4993	140	191	52	96,21%
17.03.2007	6:17	992	45	265	130	99,68%
01.04.2007	5:34	14096	862	233	79	81,67%
05.04.2007	5:09	22441	126	253	93	43,40%
09.04.2007	6:29	6978	20	269	115	10,10%
21.04.2007	5:09	468	0	734	74	0,36%
21.04.2007	5:52	303	0	765	88	0,17%
23.04.2007	4:57	191	0	778	67	0,13%
23.04.2007	6:35	48	0	761	64	0,02%
24.04.2007	5:40	211	0	788	60	0,12%

Таблица 2.13

Оценки высоты границы снега и относительной заснеженности районов Красноярского водохранилища за 2007 год.

Дата	Время	Объём выборки	Число границащих с облаком	Средняя высота, м	Среднеквадратичное отклонение, м	Оценка заснеженности
р-н.Абакан						
09-01	4:08	15926	133	926	392	85,27%
09-01	5:46	37247	152	1083	422	73,69%
16-01	4:14	19010	59	947	403	81,81%
16-01	5:52	34313	40	1038	408	69,25%

19-03	4:27	23954	229	1014	339	55,86%	
05-04	5:09	29175	277	1110	351	47,27%	
06-04	4:14	13524	67	1112	366	42,97%	
06-04	5:55	18935	42	1181	385	35,30%	
24-04	5:40	11925	39	1452	354	23,45%	
04-05	4:39	11901	0	1754	346	15,16%	
02-06	4:08	7874	114	1742	334	15,18%	
02-06	5:46	8246	329	1801	322	12,72%	
07-06	4:26	2258	0	2060	268	1,58%	
07-06	6:04	2291	0	1987	274	1,64%	
р-н.Туба							
09-01	5:46	19105	213	845	379	90,27%	
30-01	4:27	38057	157	792	336	77,35%	
06-04	4:14	28197	65	783	312	71,58%	
06-04	5:55	21818	11	822	330	61,26%	
07-04	4:57	32568	118	805	315	77,20%	
11-04	4:33	30361	496	833	307	64,03%	
22-04	4:14	18915	41	948	263	44,87%	
22-04	5:52	13054	4	1056	268	36,91%	
23-04	4:57	23714	133	908	255	52,13%	
24-04	4:02	10621	24	916	284	57,67%	
24-04	5:40	13457	0	921	287	53,00%	
26-04	3:50	11486	11	1028	267	44,51%	
26-04	5:28	16005	56	1094	276	38,03%	
07-06	4:26	10589	610	1589	265	11,08%	
29-06	3:52	741	38	1890	233	0,62%	
Лес							
09-01	4:08	14380	45	600	251	87,35%	
09-01	5:46	13707	30	611	241	88,37%	
15-03	4:51	22231	95	684	217	74,98%	
01-04	3:56	14944	105	563	212	42,42%	
01-04	5:34	20609	371	605	233	59,79%	
06-04	4:14	20569	14	609	236	32,81%	
06-04	5:55	14963	5	587	237	35,35%	
10-04	5:28	13470	227	618	224	15,98%	
11-04	4:33	11755	145	700	263	14,84%	
14-04	5:03	11760	356	734	248	14,50%	
22-04	4:14	3377	0	903	270	5,16%	
22-04	5:52	2353	3	894	322	3,55%	
23-04	4:57	5935	2	862	242	7,88%	
24-04	4:02	2368	0	894	283	6,97%	
24-04	5:40	2838	0	893	285	4,33%	
04-05	4:39	1133	88	1177	226	2,27%	
12-05	5:28	553	37	1334	134	1,30%	
02-06	4:08	154	0	1472	179	0,13%	
02-06	5:46	261	0	1529	133	0,24%	
Поле							
01-04	5:34	6287	290	447	111	17,92%	
06-04	4:14	4002	2	436	127	8,20%	
06-04	5:55	2991	1	418	130	9,69%	

10-04	5:28	3567	77	403	118	6,57%
11-04	4:33	3644	1	433	121	4,85%
14-04	5:03	3122	110	443	124	4,47%
21-04	5:09	859	66	533	115	1,02%
22-04	4:14	146	0	496	177	0,13%
22-04	5:52	317	1	491	163	0,31%
23-04	4:57	538	4	560	126	0,49%
24-04	4:02	26	0	279	149	0,03%
24-04	5:40	168	0	524	179	0,14%
12-05	5:28	7	0	263	1	0,01%

Таблица 2.14

Оценки высоты границы снега и относительной заснеженности районов Саяно-Шушенского водохранилища за 2007 год.

Дата	Время	Объём выборки	Число границ с облаком	Средняя высота, м	Среднеквадратичное отклонение, м	Оценка заснеженности
р-н. Дархатская котловина						
08-04	4:02	5583	931	2200	314	43,86%
05-05	3:44	4466	0	2334	302	20,07%
27-05	4:45	5056	40	2465	241	10,31%
04-06	3:56	8092	45	2378	255	21,13%
р-н. Хемчин						
04-05	4:39	6558	173	2501	309	7,92%
19-05	5:34	4360	0	2588	288	4,28%
02-06	5:46	10801	547	1989	451	29,55%
Север						
06-04	4:14	66160	436	1253	268	62,44%
07-04	4:57	79748	1069	1270	277	65,46%
23-04	4:57	45631	1080	1423	240	42,03%
24-04	4:02	32549	94	1443	243	40,01%
24-04	5:40	29589	22	1463	249	42,53%
26-04	5:28	33510	415	1520	250	35,05%
Юг						
08-04	4:02	23074	843	1788	329	34,87%
25-04	4:45	21977	1232	1902	282	29,37%
04-06	3:56	9487	57	2231	207	7,15%
04-06	5:34	8030	31	2190	234	7,00%

Анализ полученных результатов показал наличие небольшой разницы в наблюдениях за один и тот же день, но с разных витков, например, 16 января, 6 и 24 апреля для бассейна Красноярского водохранилища. Она также наблюдается в средней высоте кромки снега, например, 24.04 и 04.06 для бассейна Саяно-Шушенского водохранилища. Разница по площадям заснеженности доходит до нескольких процентов, а разница в средней высоте границы снега от 20—40 м при высокой и средней заснеженности до 200 м (24.04 в бассейне Красноярского водохранилища) при низкой.

Данное явление объясняется влиянием на классификацию снега угла зрения и угла падения Солнца, с одной стороны, и движением облачности, с другой стороны. В совокупности эти

факторы приводят этой небольшой разнице в показаниях. Для повышения стабильности в результатах оценки площадей заснеженности можно рекомендовать выбирать из двух витков тот, который ближе ко времени восходящего узла КА Terra — 12:30 местного декретного летнего времени или 11:30 зимнего. Для приёмной станции в Красноярске это соответствует, примерно, 4:30 UTC для бассейнов Красноярского и Саяно-Шушенского водохранилищ и 5:00 UTC — для бассейна Обского водохранилища. В работе [24] авторы рекомендуют использовать взвешивающую формулу, учитывающую как высоту Солнца так высоту КА, при составлении суточных композитов. Поскольку в данном случае композиты не используются принципиально, то остаётся только выбрать наилучший с точки зрения освещённости виток.

Выводы

Из-за рекордно тёплой зимы 2006—2007 гг. площади заснеженности во всех бассейнах наблюдались наименьшие за весь период наблюдения, начиная с 2004 года. В конце февраля — начале марта не наблюдался традиционно смещённый к весне максимум площадей заснеженности, а вместо него в течение зимы наблюдались оттепели, сменяемые снегопадами. Рекордно тёплый апрель способствовал быстрому таянию, что привело к опережению сроков схода снега по сравнению с 2006 годом к концу второй декады апреля от 2 недель в бассейне Обского водохранилища до 40 дней в бассейнах Красноярского и Саяно-Шушенского водохранилищ. С другой стороны, холодный май замедлил таяние, и к началу июня во всех бассейнах площади заснеженности сравнялись со средними многолетними значениями.

Усовершенствования Службы мониторинга заснеженности и её информационного сайта теперь позволяют наглядно наблюдать все эти процессы в реальном времени на графиках, тогда как ранее эти результаты приводились только ежегодном отчёте.

Глава 3. Бассейн водохранилища Обской ГЭС

Первый вариант модели прогноза притока воды в водохранилище Новосибирской ГЭС (назовем его «Обь– 99») был разработан в 1999 г [29] (тема 1.9.2.7 плана НИР Росгидромета, отчет по НИР: «Разработать метод краткосрочного прогноза ежедневных и максимальных уровней (расходов) воды рек бассейна Оби, притока воды в Новосибирское водохранилище в период весеннего половодья на основе спутниковой и наземной информации», Красноярский НИЦ, 1999). Для оптимизации параметров модели 1999 г использованы ежедневные данные наблюдений с 21 марта по 30 июня за 1987–1998 гг. (12 лет). На момент разработки метода в распоряжении его авторов имелись данные мониторинга по спутнику НОАА всего за 1 год.

Ниже представлен усовершенствованный вариант модели. В его основу положены материалы ежедневных гидрометеорологических наблюдений за период 1987 – 2007 гг. (21 год) и информация спутника “Терра” о динамике снегового покрытия районов бассейна Верхней Оби за 2004, 2005, 2006 и 2007 гг.

3.1. Ландшафтно-гидрологическая характеристика бассейна

Рассмотрим бассейн р. Оби до створа Новосибирской ГЭС. Ландшафтно-гидрологическая характеристика этого бассейна была рассмотрена в [29]. Ниже приведем ее с уточнениями и дополнениями.

По условиям формирования стока и для адаптации модели формирования стока разделим рассматриваемый бассейн на следующие районы (рис 3.1., табл. 3.1.):

Таблица 3.1.

Площади (км²) районов в бассейне р Оби до г Барнаула

Районы (подрайоны)						
Обь-1	Обь-2	Обь-3		Катунь-2	Катунь-3	Бия-2
		36412				
Замыкающий створ:		Катунь-1		32068	11798	15032
Новосиб водохр–	123720	29600	Бия-1			
		14490	21922			

Растительный покров и другие характеристики ландшафтов исследуемой территории следуют территориальному изменению увлажнения и теплообеспеченности. На склонах верхняя граница степного и лесостепного пояса поднимается примерно до 600 м, выше до 1700-1800 м расположен лесной горно-таёжный пояс, далее следуют частично покрытые лесом и безлесные горные луга и высокогорные гольцовые тундры. В сухих котловинах и в засушливых юго-

восточных районах Алтая степной ландшафт занимает значительную часть горных склонов, до высоты 1500 м и больше.

Наличие гор обуславливает вертикальную поясность климатических условий района. Если устойчивый переход температуры воздуха через 0 градусов в степных предгорьях происходит в конце марта - начале апреля, то в горах на высоте около 3000 м он наступает только в июне. Количество осадков за год изменяется от 350-450 мм в засушливых степях до 1000-1400 мм и больше на западных, юго-западных и северо-западных склонах, открытых влагоносным ветрам. Аналогично распределены запасы воды в снежном покрове, составляющие от 15-20 % годовой суммы осадков в степях, до 30-40 % в высокогорных районах, и 100 % - в зоне вечных снегов и ледников. На рис 3.2. представлено совмещенное с картой космическое изображение бассейна Верхней Оби от 3 июня 2004 г, на котором отмечены зоны с наибольшей снежностью, где снежный покров не успел растаять.

Район Обь-1 расположен в северной степной, предгорной и горной частях рассматриваемой территории и включает бассейн рр Алей, Бобровка, Петровка и др. По условиям рельефа и увлажнённости район делится на:

- возвышенное среднегорье Алтая (верховья р Алей), предгорные участки в среднем течении правобережья Алей и в истоках правых притоков р. Оби (отроги Колыванского хребта и Бийско-Чумышская возвышенность) с годовой нормой осадков 850 мм и выше, с густой гидрографической сетью;

- степные пространства в левобережье Алей и Приобского плато, представляющие засушливые плоские с бессточными понижениями участки и более возвышенные слабоволнистые поверхности с годовой суммой осадков 350-450 мм.

В районе Обь-1 запасы воды в снежном покрове увеличиваются от 20 -70 мм в нижних высотных зонах до 150-210 мм и более в зоне 800-1000м.

Район Обь-2 (рис 3.4.1) располагается в северо-западной части исследуемой территории (бассейны рр Чарыш, Песчаная, Ануй и др). Орографическую основу Северо-Западного Алтая образуют хребты: Тигирецкий, Бащелакский, Коргонский, ориентированные с юго-востока на северо-запад. Средняя высота хребтов – 1600-2000 м, отдельные вершины и гребни свыше 2600 м. К северо-западу абсолютные высоты снижаются до 800-1200 м, обширными становятся пенеппенизированные поверхности, чередующиеся с резкорасчлененными низкогорьями, сменяющиеся на западе и северо-западе в мелкосопочник подгорной равнины. Хребты являются естественным барьером на пути влагонесущих потоков. Территория Северо-Западного Алтая первой принимает влагу, идущую с запада. Отмечается значительное количество атмосферных осадков, до 700 - 1000 мм и более на склонах Тигирецкого хребта.

В низкогорьях получили развитие луговые степи и лесостепи. Земли с выщелоченными и оподзоленными черноземами выборочно распаханы. С высоты 800-1000 м их сменяют черневые высокотравные леса. Значительна доля черневых (осиново-пихтовых, осиново-пихтовых и осиново-березовых) лесов на горно-лесных почвах. На резкорасчлененных крутосклонных отрогах Башцелакского и Тигирецкого хребтов появляются лесостепные ландшафты. По мере увеличения абсолютных высот и степени вертикального и горизонтального расчленения происходит исчезновение суглинистых покровов. Здесь на глубокорасчлененных среднегорьях значительна по распространению темнохвойная тайга, которая с дальнейшим ростом абсолютных высот сменяется высокогорными комплексами с преобладанием альпийско- и субальпийско-луговых. Фрагментарно с чередованием скалистых гребней, пиков, карлингов, покрытых россыпями из глыб в вершинной части Башцелакского, Коргонского и Тигирецкого хребтов, развита кустарниковая и луговая и мохово-лишайниковая тундра.

Запасы воды в снежном покрове увеличиваются от 50-100 мм в зоне высот 200-400 м до 300 мм и больше на высоте 2000-2500 м (зоны 1,2 на рис 3.2.).

Район Обь-3, объединяющий подрайоны **Катунь-1** и **Бия-1**, расположен в нижнем течении р Катунь и в среднем и нижнем течении р Бия. Район представлен степными и лесостепными ландшафтами в предгорной части и темнохвойными лесами в горах.

Территория Северного Алтая (подрайон Катунь-1), что к западу от хребта Иолго, к северу от Семинского и к востоку от Башцелакского хребтов, имеет простирание основных хребтов с северо-северо-запада на юго-юго-восток со средними высотами 1600-1800 м. К северу абсолютные высоты снижаются, принимая облик низкогорий (до 600-800 м) с обширными поверхностями выравнивания. Скальные породы, лежащие в основе территории, прикрыты плащом суглинков. В пределах слаборасчлененной пологосклонной низкогорной части господствуют лесостепи. Значительна доля степей и остепненных лугов на черноземах выщелоченных и оподзоленных. Лесные ландшафты среднегорий в большей степени представлены лиственничными (парковыми), сосновыми и березово-сосновыми лесами на горно-лесных серых и горно-лесных черноземовидных почвах. Встречаются лесостепи и высокотравные луга на горно-луговых почвах. Годовое количество осадков в среднем составляет 550-700 мм.

Северо-Восточный Алтай (подрайон Бия-1) - достаточно влажная территория Горного Алтая. Северная и южная её части различаются по характеру ландшафтов. На севере господствуют низкогорья (700-800 м). Широкие плосковершинные поверхности чередуются с обширными долинами и понижениями, занятыми болотами. К югу абсолютные высоты растут и рельеф сменяется на среднегорный (1200-1900 м). В районах хребтов Алтынту и Корбу встречаются высокогорья. Годовая величина атмосферных осадков здесь значительна - 900 - 1000 мм. Лесными ландшафтами занято более 60% площади. В северной части

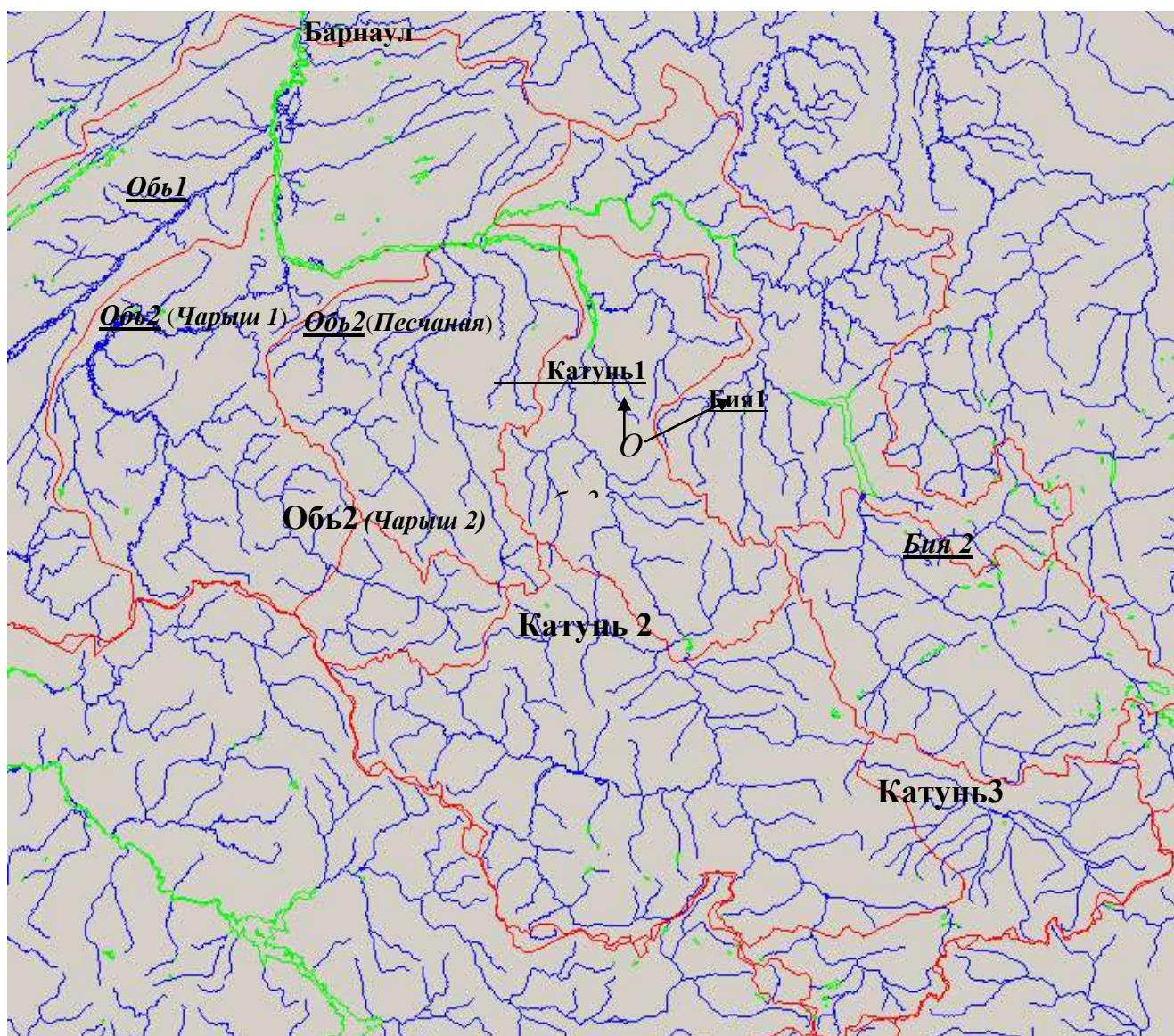


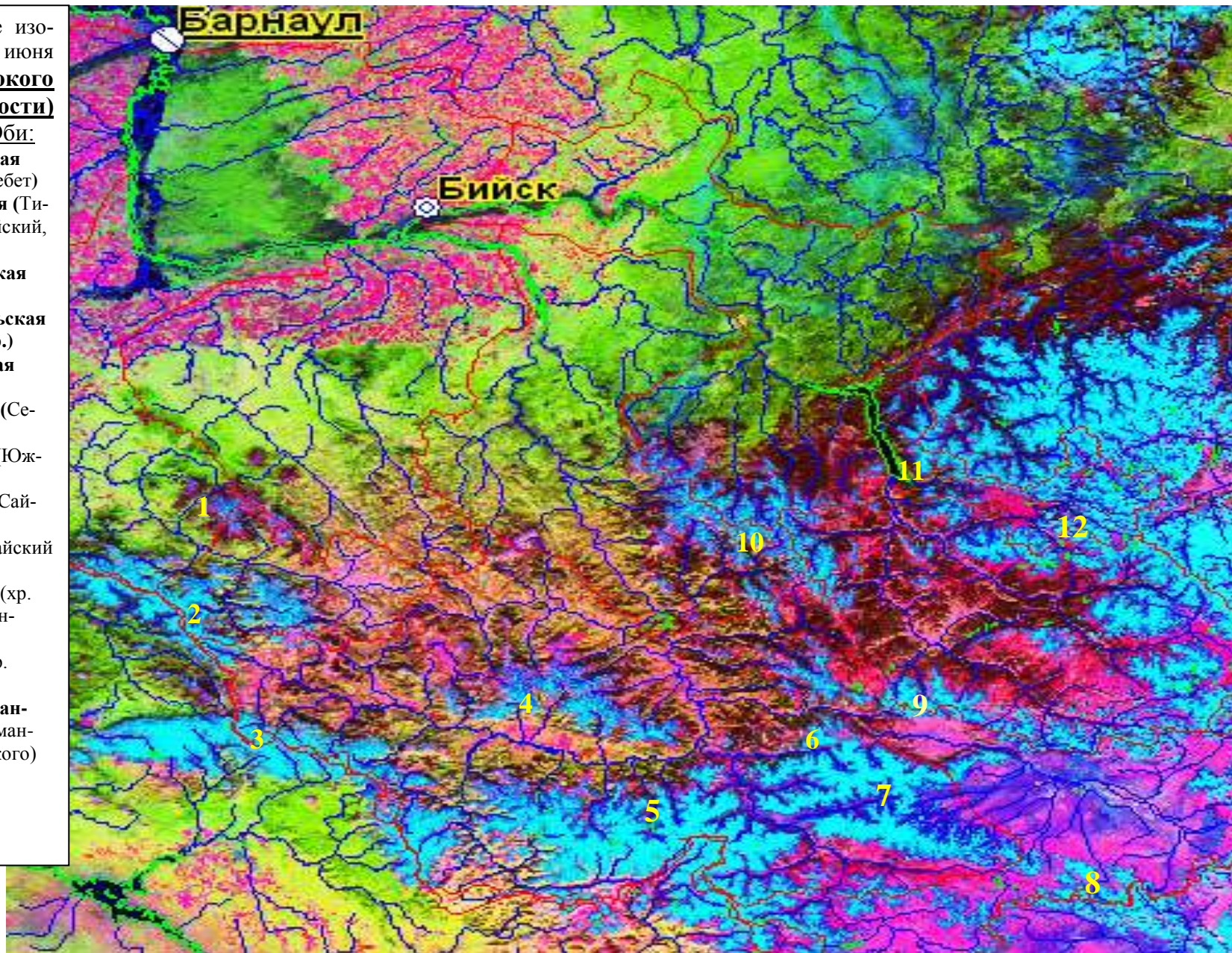
Рис 3.1 Схема ландшафтно-гидрологических районов в бассейне Верхней Оби

доминирует черневой высокотравный лес (осиново-пихтовый, осиновый высокотравный, кедрово-елово-пихтовый) и высокотравные луга.

На юг и восток в среднегорной зоне - темнохвойно-таежный лес, появляющиеся с высоты около 1200-1300 м. Высокогорные ландшафты развиты мозаично, фрагментарно - на значительных высотах Корбу, Алтынту, в отрогах хребтов Иолго и Абаканского с высот 1700-1900 м в условиях интенсивного расчленения. Здесь высокая атмосферная увлажненность способствует распространению альпийских и субальпийских лугов, сменяющихся луговыми и мохово-лишайниковыми тундрами, переходящими на вершинах хребтов в каменистые россыпи с небольшими пятнами снежников и небольших ледничков.

Рис 3.2 Космическое изображение (Терра) от 3 июня 2004 г. **Зоны высокого увлажнения (снежности)** в бассейне Верхней Оби:

1. **Право-чарышская** (Башчелакский хребет)
2. **Лево-чарышская** (Тигирецкий, Коксуйский, Коргонский хр.)
3. **Верхне-коксинская** (хр. Холзун)
4. **Катунско-урсульская** (Теректинский хр.)
5. **Верхне-катунская** (Катунский хр.)
6. **Северо-чуйская** (Северочуйский хр.)
7. **Южно-чуйская** (Южночуйский хр.)
8. **Сайлюгемская** (Сайлюгемский хр.)
9. **Курайская** (Курайский хр.)
10. **Верхне-бийская** (хр. Иолго, Сумультинский)
11. **Прителецкая** (хр. Корбу)
12. **Верхне-чулышманская** (хр. Чулышманский, Шапшальского)



Запасы воды в снеге в рассматриваемом районе изменяются по высоте от 50 – 100 до 300 – 320 мм (зоны 10, 11, 12, рис 3.2).

Район Катунь-2 (верхнее и среднее течение р Катунь) располагается в Центральном Алтае. Центральный Алтай в связи с внутренним положением в горной системе, наибольшими абсолютными высотами (со средней высотой 2200-2600 м, и максимальной для всего Алтая высотой 4506 м, – гора Белуха, Катунский хребет), отличается значительной контрастностью и мозаичностью ландшафтной структуры. Здесь широкий спектр высотной поясности. Хребты Катунский, Северо- и Южно-Чуйский, Теректинский покрыты снежниками и ледниками. Хребты имеют широтное направление или близкое к нему. Здесь же встречаются обширные межгорные котловины на высотах 700-1000 м: Уймонская, Канская, Абайская, Катандинская, днища которых сложены рыхлыми отложениями (песками, суглинками, валунно-галечниковым материалом), с редкими останцами из коренных пород или цепочки невысоких кряжей, разделяющих котловины на несколько более или менее обособленных участков. Значительная расчлененность определяет разнообразие климата. В межгорных котловинах наименьшее количество осадков 330-350 мм по сравнению с высокогорьями, где их годовая сумма составляет 700 - 1500 мм. Среди ландшафтов значительна доля высокогорных, занимающие более 1/3 площади. Наибольшей площадью распространения гляциально-нивальных ландшафтов отличаются хребты Катунский, Северо- и Южно-Чуйский. Это самые мощные современные центры горного оледенения Алтая. На склонах Северо- и Южно-Чуйского хребтов развиты тундровые комплексы. На глубокорасчлененных высокогорьях с чередующимися холмисто-увалистыми поверхностями выравнивания, начиная с высот 2000-2600 м значительные площади представлены альпийскими и субальпийскими лугами.

Запасы воды в снеге составляют 20-80 мм в степных котловинах до 400 мм и более в высокогорной зоне (зоны 4, 5, 6, 7, рис 3.2).

Район Катунь-3 находится в верхнем течении р Чуи и в пределах плоскогорья Укок. Защищенный высокими хребтами со всех сторон от проникновения влагонесущих ветров, это наиболее засушливый высокогорный район Алтая. Здесь на высотах 1700-2000 м располагаются Курайская и Чуйская степи – полупустыни. Район отличается пониженной увлажненностью и относительно низким снегонакоплением.

Район Бия-2 (верхняя часть бассейна Бии) включает бассейны рр. Чулышмана и Башкауса, - основных притоков Телецкого озера, из которого вытекает р Бия. Представлен Шапшальским, Курайским и др. хребтами, плоскогорьями Улаганское и Чулышманское. Широко распространены высоко приподнятые (выше 1900 м) поверхности выравнивания с достаточно суровыми климатическими условиями. По сравнению с цен-

тральными и северо-восточными районами Алтая, величина осадков снижается от 200-300 мм в котловинах, до 500 мм и более в высокогорье. Высокогорные ландшафты занимают половину площади территории. Они представлены различными вариантами тундровых комплексов: Курайский хребет – каменистые лишайниковые тундры; Шапшальский хребет – моховые и кустарниковые в сочетании с высокогорными болотами. Меньше доля альпийских и субальпийских лугов и гляционивальных ландшафтов. Особенно распространены они в районе Курайского (тундровые) и Шапшальского (гляциально-нивалные) хребтов. Лесные комплексы занимают лишь менее половины площади территории. Среди наиболее залесенных: Чулышманское нагорье, Улаганское плоскогорье, верховье р. Башкаус, где леса покрывают местами от 50 до 70 % территории. На низких террасах рек Чулышмана и Башкауса встречаются сухостепные комплексы, местами с сосновыми лесами. На склонах долин скальные выходы перемежаются с лиственничными лесами, кустарниковыми степями.

До высот 1800 - 2000 м район характеризуется низким увлажнением и снегонакоплением (70-100 мм). Выше увлажнённость района возрастает (зоны 10, 12, рис 3.2).

3.2. Исходные данные

Учитывая современный состав действующей оперативной информационной сети, в настоящей работе непосредственно привлечены следующие данные наблюдений:

Таблица 3.1

Снегомерные съёмки	Ежедневные осадки	Температура воздуха
1 Кызыл-Озек, Н=324 м;	1 Кара-Тюрек, 2600м	1 Кара-Тюрек, 2600 м
2 Усть-Кокса, Н= 977 м;	2 Усть-Кокса, 977 м	2 Усть-Кокса, 977 м
3 Катанда, Н= 948 м;	3 Катанда, 948 м	3 Катанда, 948 м
4 Усть-Улаган, Н= 1200 м;	4 Онгудай, 831 м	4 Онгудай, 831 м
5 Балыкча, Н= 472 м;	5 Чемал, 410 м	5 Кызыл-Озек, 324 м
6 Яйлю, Н= 441 м;	6 Кызыл-Озек 324 м	6 Яйлю, 441 м
7 Турочак Н=326 м;	7 Бея, 560 м	7 Бийск, 200 м.
8 Артыбаш, Н=600 м;	8 Яйлю, 441 м	
9 Коксинский МАРШРУТ, Н= 523 м.	9 Турочак 326 м	
	10 Бийск, 200 м	

Для характеристики русловых запасов воды использовались наблюдения за ходом ежедневных уровней воды в следующих створах: 1) р. Кокса-Усть-Кокса, р. Урсул-Онгудай, 3) р.Катунь-Чемал, 4) р. Бия- Кебезень, 5) р. Бия- Турочак, 6) р. Катунь - Сростки., 7) р. Бия- г. Бийск, 8) р. Обь-г. Барнаул. Приток воды в водохранилище Новосибирской ГЭС определен по методике, используемой в отделе Гидрологических прогнозов Гидрометцентра ЗСУГМС. В качестве индекса предшествующего увлажнения бассейна использовались суммы осенних расходов воды (IX-XI) в пунктах Урсул-Онгудай и Бия-Турочак.

Оценка снегозапасов. Метеорологические станции и посты в горных районах Сибири располагаются в основном в населённых пунктах в долинах рек. В исследуемом районе редкая сеть осадкомеров и снегомерных съёмов (один пункт примерно на 2000 км²) не позволяет достоверно оценить увлажнённость территории. В последние годы, вследствие кризисных процессов перестраивающейся экономики и сокращения финансирования Гидрометеорологической службы, наблюдается сокращение сети наблюдений, прекращение снегомерных работ на авиаснегомерных пунктах (АСП) и сокращение работ на снегомерных пунктах.

В таблице 3.2 представлены данные о запасах воды в снежном покрове перед началом снеготаяния (в основном на 21 марта). В скобках показаны восстановленные данные (в годы с отсутствием наблюдений) на основе корреляционных связей снегозапасов в действующих пунктах снегомерных съёмов. Например, запасы воды в снежном покрове на Коксинском маршруте (средние для СП № 5,9,12,13) в 1989, 1990, 1993, 1994, 1995 и 2000 гг получены по их связи со снегозапасами в пунктах Усть-Кокса и Катанда (коэффициент множественной корреляции 0.84, Т-статистики соответственно 3.10 и 1.70):

$$S_{СП} = 1.35 S_{Усть-Кокса} + 0.65 S_{Катанда} + 77.3$$

Стандартная ошибка восстановленных данных на Коксинском маршруте за эти годы составляет 29 мм (19 % от средней многолетней величины). Максимальная разница вычисленных и фактических значений составила 61 мм (30 % от запаса воды в снеге). Следовательно, восстановленные данные могут содержать погрешности, достигающие 30 %. Ошибки оценки снегозапаса вызваны также ограниченностью числа снегомерных маршрутов на высотах более 1000 м, их отсутствием в зонах наиболее высокого снегонакопления. Это не может не повлиять на снижение точности прогнозов стока весеннего половодья и притока воды в Обское водохранилище.

Н.В. Игловской совместно с Д.А. Бураковым выполнено картографирование запасов воды в снежном покрове горной части бассейна Верхней Оби. С этой целью привлечены имеющиеся данные наблюдений сети пунктов УГМС (в том числе данные снегопунктов Кайтанакского и Коксинского маршрутов), космическая информация спутников НОАА, результаты снегомерных съёмов ЗСУГМС, а также материалы публикаций [7, 8, 14, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27].

Таблица

3.2

Запасы воды в снежном покрове перед началом снеготаяния

Год	Кузыл-Озек	Усть-Кокса	Катанда	Усть-Улаган	Балыкча (Онгудай)	Яйлю	Турочак	СП №5,9,12,13 (снегопункты)
1987	122	25	54	30	16	133	206	96
1988	44	37	74	48	(20)	118	174	197

1989	55	10	39	31	(28)	78	92	(124)
1990	19	13	51	31	26	105	163	(122)
1991	106	(32)	38	26	25	99	174	150
1992	108	42	34	62	14	113	165	138
1993	123	37	90	48	25	151	200	(189)
1994	106	34	62	32	26	116	119	(183)
1995	50	(28)	34	39	14	92	138	(141)
1996	68	31	39	(12)	(15)	67	118	157
1997	94	90	92	40	21	165	278	281
1998	70	12	53	8	29	75	105	137
1999	99	12	49	44	45	124	151	134
2000	48	13	61	37	45	83	162	(116)
2001	119	71	133	47	17	213	272	235
2002	15	(19)	40	26	11	74	100	108
2003	60	17	82	40	27	80	143	127
2004	32	23	64	49	16	157	175	211
2005	30	19	61	40	14	93	168	153
2006	120	11	50	24	16	175	230	134
2007	45	34	38	(34)	8	66	133	125
Среднее	73	20	59	36	22	113	165	155
	СП	Кузыл-Озек	Усть-Кокса	Катанда	Усть-Улаган	Балыкча (Онгудай)	Яйлю	Турочак
СП	1	Коэффициенты парной корреляции снегозапасов, месячного и квартального притока						
Кузыл-Озек	0.24	1	корреляция снегозапасов					
Усть-Кокса	0.82	0.38	1					
Катанда	0.69	0.30	0.59	1				
Усть-Улаган	0.35	0.11	0.36	0.36	1			
Балыкча (Онгудай)	-0.12	0.11	-0.30	0.09	-0.017	1		
Яйлю	0.64	0.58	0.54	0.69	0.43	-0.08	1	
Турочак	0.61	0.52	0.67	0.68	0.39	-0.11	0.87	1
Артыбаш	0.64	0.53	0.67	0.62	0.30	-0.11	0.82	0.84
Тюнгур	0.70	0.31	0.61	0.84	0.36	0.004	0.65	0.68
Приток за:	корреляция снегозапасов с притоком воды в водохранилище Обской ГЭС							
апрель	-0.08	-0.16	-0.06	-0.04	0.22	-0.05	-0.003	-0.23
май	0.60	0.34	0.48	0.62	0.32	-0.07	0.80	0.86
июнь	0.18	0.22	0.25	0.35	0.34	-0.34	0.44	0.28
апрель+май	0.31	0.08	0.26	0.36	0.40	-0.08	0.51	0.35
апр+май+июнь	0.29	0.16	0.29	0.41	0.42	-0.23	0.55	0.37

Результаты выполненного анализа территориального распределения норм запаса воды в снеге ниже использовались как первое приближение и корректировались на основе оптимизации (табл. 3.2).

Речной сток за второй квартал формируется за счёт запасов снега и осадков за апрель-июнь. Приведённые в табл. 3.2 данные по стоку за второй квартал, рассчитанные по материалам Западно-Сибирского УГМС, имеют тот же порядок, что и запасы воды в

Таблица 3.4.

Доли площадей высотных зон в районах

ОВ-1										
Н, м	165	495	825	Н- Средняя высота зоны (м)						
f	0.772	0.200	0.028	f- Доли площади зон (в долях площади района)						
ОВ-2										
Н	400	825	1155	1485	1815					
f	0.291	0.353	0.178	0.107	0.071					
Катунь-2										
Н	825	1155	1485	1815	2145	2475	2805	3135	3465	4125
f	0.023	0.105	0.176	0.217	0.180	0.124	0.083	0.058	0.026	0.007
Катунь-3										
Н	1485	1815	2145	2475	2805	3135	3465	3630		
f	0.005	0.096	0.195	0.276	0.280	0.114	0.029	0.004		
ОВ-3										
Н	270	600	930	1260	1590	1920	2250	2580	2910	
f	0.130	0.285	0.180	0.121	0.097	0.080	0.065	0.034	0.08	
Бия-2										
Н	400	730	1060	1390	1720	2050	2380	2710	3040	3370
f	0.006	0.010	0.027	0.083	0.182	0.248	0.259	0.138	0.039	0.008

Для оценки моментов кривых добегаания (см. главу 1 отчета, – этап 2005 г) каждый район делится эквидистантами на межэквидистантные площадки, определяются расстояния по руслам L_1 и L_2 (табл.3.5, см. примечание), а также доли среднего многолетнего весеннего стока с каждой из них.

Таблица 3.5.

Количественные характеристики районов бассейна для расчета параметров кривых добегаания

Район 1										
L_1 *)	0.0	113.0	226.0	339.0	452.0	565.0	678.0			
L_2 *)	113.0	113.0	113.0	113.0	113.0	113.0	101.0			
f *)	0.255	0.214	0.291	0.120	0.060	0.030	0.030			
Район 2										
L_1	90.0	90.0	90.0	90.0	35.0					
L_2	90.0	90.0	90.0	90.0	35.0					
f	0.180	0.267	0.346	0.153	0.054					

Район 3										
L ₁	812.0	867.0	922.0	977.0	1032.0	1087.0	1142.0	1197.0		
L ₂	55.0	55.0	55.0	55.0	55.0	55.0	55.0	20.0		
f	0.115	0.153	0.170	0.146	0.141	0.190	0.078	0.006		
Район 4										
L ₁	962.0	987.0	1012.0	1037.0	1062.0	1087.0	1112.0	1137.0	1162.0	
L ₂	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	20.0	
f	0.029	0.032	0.023	0.036	0.086	0.129	0.260	0.323	0.080	
Район 5										
L ₁	507.0	557.0	607.0	657.0	707.0	757.0	807.0	857.0	982.0	770.0
L ₂	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	30.0
f	0.047	0.076	0.105	0.124	0.091	0.127	0.253	0.103	0.043	0.031
Район 6										
L ₁	907.0	952.0	997.0	1042.0	1087.0	1132.0				
L ₂	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0	25.0				
f	0.083	0.243	0.205	0.275	0.166	0.028				

*) **Примечание:**

L₁ – Расстояние по руслам от нижней границы межэквидистантной площадки до замыкающего створа, км.

L₂ – Расстояние по руслам между эквидистантами, км.

f – Доля стока с межэквидистантной площадки.

3.3. Оптимизация параметров модели прогноза притока воды в водохранилище Обской ГЭС (вариант «Обь– 2007»)

Последовательность оптимизации параметров на примере бассейнов Саяно-Шушенского и Красноярского водохранилищ представлена в [28, 29]. Ниже рассмотрим основные особенности оптимизации по рассматриваемому бассейну.

В качестве исходных значений параметров приняты результаты оптимизации по варианту «Обь– 99» [29]. Исключительное разнообразие условий формирования стока (см. раздел 3.1.) и недостаточное гидрометеорологическое обеспечение рассматриваемой территории позволяют лишь приближенно оценить территориальное распределение средних многолетних снеготопивости и стока за второй квартал. По этой причине приведенные выше характеристики снегонакопления и стока использовались в процессе оптимизации варианта «Обь– 2007» как начальное приближение. В основу дальнейшей оптимизации параметров этого варианта положены данные спутниковых наблюдений (КА «Терра») за динамикой площади заснеженности (снегового покрытия) районов бассейна в период снеготаяния в 2004, 2005, 2006 и 2007 гг.

Во второй главе настоящего отчета представлена сравнительная характеристика динамики схода снежного покрова в 2004 – 2007 гг по спутниковым данным. Следует отметить, что все эти годы отличались облачной погодой в период снеготаяния. Особенностью весны 2005 года было частое выпадение осадков при температуре воздуха около +2⁰С. При температуре до + 2⁰С расчетная модель принимает осадки за твердые, что влечет за собой резкое возрастание (до 100 %) модельной площади снегового покрытия территории. Спутниковое изображение может не давать такой картины в связи с тем, что снег в подобных случаях насыщается водой вследствие дневного таяния и выпадения смешанных

осадков (снег с дождем). Может образоваться «снежное болото», а при похолоданиях – и ледяная корка. В этих условиях альbedo оказывается небольшим и спутниковое изображение не фиксирует заснеженную поверхность, в то время как расчетная модель дает увеличение заснеженности до 100 %. Именно такая картина часто наблюдалась весной 2005 года. Ниже (табл. 3.6.) представлен пример (1-й район, высотная зона 825 м). 6 мая при температуре воздуха $t = +9^{\circ}\text{C}$ снежный покров, согласно расчетам, залегал на площади 50 %. 7 мая при температуре $t = +0.11^{\circ}\text{C}$ и осадках $x = 3.5$ мм снеговое покрытие по расчетам возрастает до 100 %. Космическая информация в этом случае не зафиксировала «скачка» заснеженности. Подобные случаи принимались во внимание при сопоставлении спутниковых и расчетных данных. Они имели место в основном в 2005 году.

Пример расчета снегового покрытия						Таблица 3.6.
Год	мес.	дата	x	t	f_s	ПРИМЕЧАНИЕ: x – суточные осадки, мм; t – температура воздуха; f_s – площадь снегового покрытия
2005	5	5	2.0	6.21	51	
2005	5	6	9.0	4.51	50	
2005	5	7	3.5	0.11	100	
2005	5	8	0.0	0.21	100	
2005	5	9	0.3	7.61	49	
2005	5	10	1.6	10.8	47	

Оптимизация высотного распределения снегозапасов проводилась путем многовариантных расчетов, критерием качества которых являлось получение наилучшего совпадения модельных и спутниковых (КА «Терра») данных о динамике площадей снегового покрытия районов бассейна. Оказалось, что полученные таким путем нормы снегонакопления в большинстве случаев существенно меньше, чем исходные, что согласуется с ландшафтными особенностями территории, – широким распространением засушливых межгорных котловин и участков склонов, защищенных от проникновения влагонесущих воздушных потоков.

Сравнительная оценка динамики заснеженности по данным ИСЗ «Терра» и модельным расчетам после рассмотренного этапа оптимизации представлена в табл. 3.7. Совпадение вычисленных и модельных значений снегового покрытия следует считать удовлетворительным, кроме рассмотренных выше случаев в 2005 году. Отклонения до 10 % при высокой заснеженности и в 3–6 % на заключительной фазе снеготаяния связаны как с погрешностями расчета интенсивности таяния снега по средней суточной температуре воздуха, а также недостаточной репрезентативностью данных наблюдений при ограниченном информационном обеспечении.

Заключительная стадия оптимизация параметров модели (А–«снеготаяние–осадки–сток») проводится в автоматическом режиме. При этом параметры снегонакопления, снеготаяния и вы-

сотные градиенты температуры воздуха в оптимизацию не включаются; оптимизируются только параметры потерь стока и параметры склоновой и русловой трансформации.

Полученные по результатам расчета (модель–2007) характеристики снегонакопления стока за второй квартал по районам и высотным зонам (табл. 3.8.) несколько отличаются от исходных значений (табл.3.3.). Они учитывают распределение снежного покрова, скорректированное по спутниковой информации (табл. 3.7.).

В отдельные годы (1988, 1989, 1994, 1995), когда снегомерная съемка на снегопунктах Кайтанакского маршрута не выполнялась или не проводились стандартные снего съемки на отдельных станциях и постах, отмечаются существенные расхождения вычисленных и рассчитанных гидрографов.

Заснеженность (%) по спутниковым данным и результатам расчетов Таблица 3.7

Дата	Районы:											
	1. (Обь-1)		2. (Обь-2) (Подрайоны: Чарыш1, Чарыш2, Песчаная)		3. (Катунь-2) Доля густых темнохвойных лесов 10%		4. (Катунь-3) Доля густых темнохвойных лесов 3%		5. (Обь-3) Подрайоны: Ка- тунь-1, Бия-1		6. (Бия-2)	
	космос	модель	космос	модель	космос	модель	космос	модель	космос	модель	космос	модель
2004 г												
15.05	0	0			36.7	54/44	22.2	34/31	17.1	9	44.0	41
17.05	0	0	4.3	0	31.3	47/40	16.4	26/24	13.2	5	37.0	34
18.05	0	0	3.6	0	27.1	43/36	14.1	20/18	11.6	4	30.5	30
19.05	0	0	3.2	0	25.2	39/32			10.2	3	26.6	27
28.05	0	0	1.5	0	13.2	22/17	5.1	6	3.0	1	9.0	19
03.06	0	0	0.7	0	12.3	17			1.6	1		
04.06	0	0	0.7	0	10.5	17	3.7	2	1.0	1	4.9	15
2005 г												
12.04	43.7	79							81.3	99		
13.04	34.4	75	63.0	73							66.8	100
22.04	1.4	97	13.6	34					39.0	55		
23.04							37.9	99/96	25.9	83		
26.04			7.5	71								
29.04	0.1	100										
02.05	0	17										
06.05	0	11			38.5	94/84			15.9	44		
09.05	0	11			27.3	94/84	17.9	80/77	12.7	40	30.5	79
19.05		0									25.2	48
07.06			0.5	0								
08.06			0.4	0	15.0	29/24						
09.06			0.4	0					1.0	2		
12.06											4.5	18
21.06			0	0	6.1	18	2.2	9	0		0.8	14
22.06			0	0	5,0	33	1.9	15	0		0.4	23

2006 г												
21.03	99.8	100										
21.04			20.7	27								
25.04	2.0	10										
12.05	0	0			45.1	56/46	41.3	42/39			54.9	48
24.05			2.4	0								
25.05					21.2	43/33	19.2	20/18			29.6	30
30.05			1.0	0								
01.06			0.7	0	14.5	24/19	11.6	10	7.1	5	19.0	22
06.06											15.24	21
08.06			0.3	0					3.1	3		
09.06					10.7	19	7.3	9				
11.06			0.1	0	7.2	17	4.6	7	1.5	2	7.7	19
13.06					6.6	16	3.5	5			5.3	18

Дата	Районы:											
	Обь-1		Обь-2 (Подрайоны: Чарыш1, Чарыш2, Песчаная)		Катунь-2		Катунь-3		Обь-3 Подрайоны: Катунь-1, Бия-1		Бия-2	
	космос	модель	космос	модель	космос	модель	космос	модель	космос	модель	космос	модель
2007 г												
31.03			79.0	70								
01.04	81.7	100										
05.04	43.4	27	19.3	26								
06.04									44.7	43		
09.04	10.1	6										
16.04			7.2	11								
21.04	0.4	0										
24.04	0.1	0	5.7	3					12.8	7		
29.04											29.0	24
04.05	00		3.1	0	22.6	26/20			5.6	1	18.5	19
11.05					29.1	22/19						
16.05							11.2	9			8.0	11
19.05					15.9	15/13	7.8	7				
07.06									0,3			
18.06	0						4.6	2				
23.06			0		5.7	9						

Таблица 3.8.

Рассчитанные значения многолетних средних запасов воды
в снежном покрове и стока за второй квартал по высотным зонам

Район 1 (ОБ-1)				
Н, м	165	495	825	Н, м – средняя высота зоны;
S, мм	72	122	176	S, мм – запас воды в снеге;
у, мм	41	86	307	у, мм – сток за второй квартал.

Район 2 (ОВ-2)										
Н, м	400	825	1155	1485	1815					
S, мм	6	24	120	240	400					
у, мм	68	101	181	244	455					
Район 3 (Катунь-2)										
Н, м	825	1155	1485	1815	2145	2475	2805	3135	3465	4125
S, мм	61	111	158	199	356	412	623	786	764	1405
у, мм	26	66	140	207	332	413	424	127	13	11
Район 4 (Катунь-3)										
Н, м	1485	1815	2145	2475	2805	3135	3465	3630		
S, мм	0	5	10	234	368	351	546	571		
у, мм	10	14	16	108	177	219	258	219		
Район 5 (ОВ-3)										
Н, м	270	600	930	1260	1590	1920	2250	2580	2910	
S, мм	14	24	48	120	180	240	348	216	180	
у, мм	92	92	112	142	196	240	307	232	202	
Район 6 (Бия-2)										
Н, м	400	730	1060	1390	1720	2050	2380	2710	3040	3370
S, мм	1	3	4	6	10	284	835	985	710	790
у, мм	15	17	19	22	26	118	357	227	48	39

Включение таких лет в оптимизацию снижает точность оценки параметров модели. В табл. 3.9. представлены критерии качества расчета ежедневного притока воды в водохранилище Обской ГЭС (модель А – «снеготаяние-осадки-сток») для выборки, в которой были исключены указанные 4 года.

Таблица 3.9.

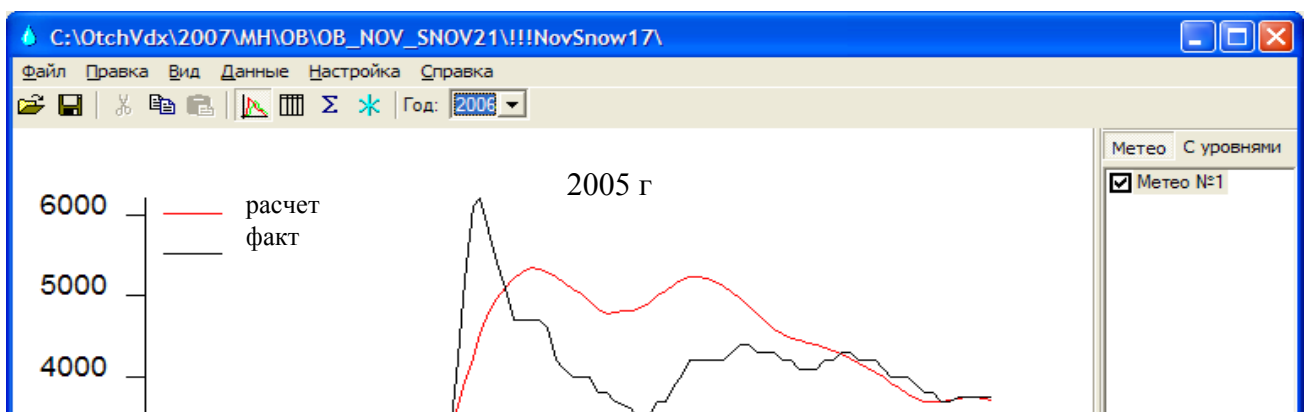
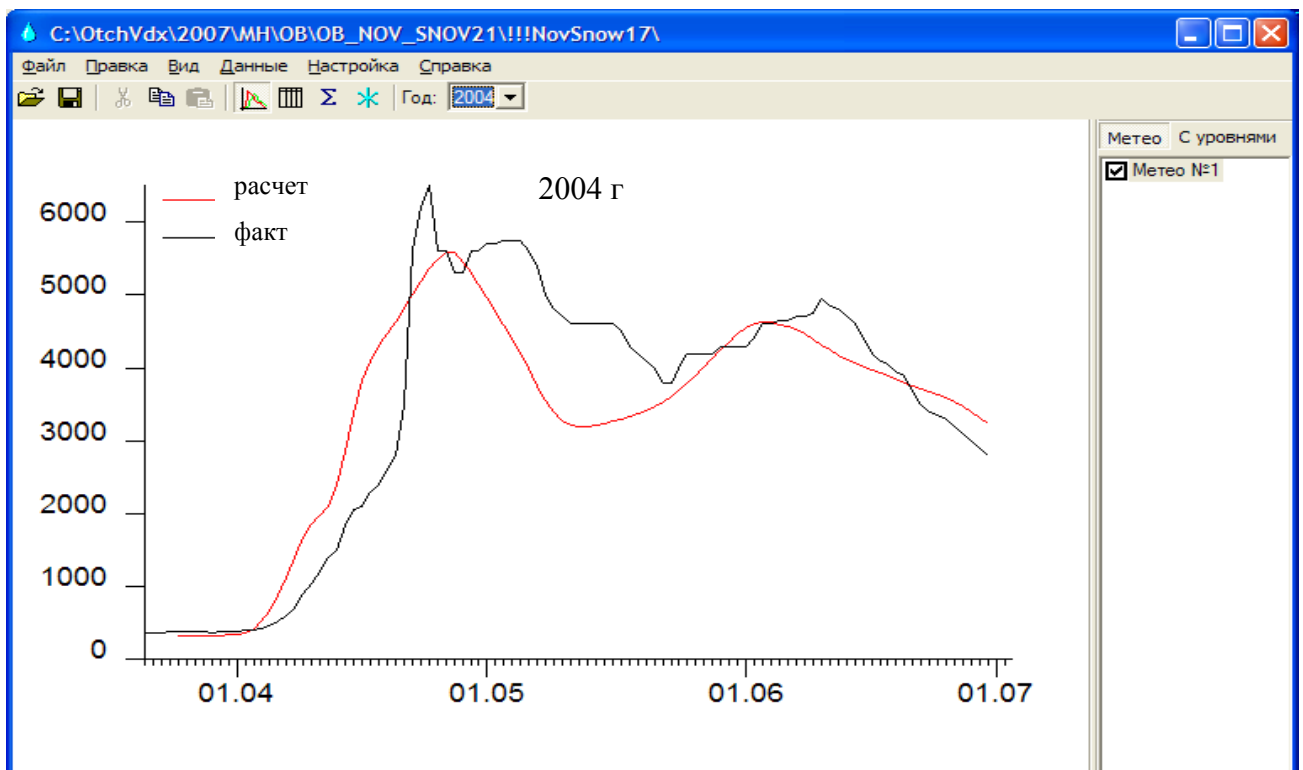
Характеристики точности расчета ежедневного бокового притока воды в водохранилище Обской ГЭС по модели А – «снеготаяние-осадки-сток»

Среднее квадратичное отклонение (σ_i) притока за i суток, ($\text{м}^3/\text{с}$)	$i=5$ $\sigma_5=793$	$i=6$ $\sigma_6=896$	$i=7$ $\sigma_7=991$	$i=8$ $\sigma_8=1082$	$i=9$ $\sigma_9=1170$	$i=10$ $\sigma_{10}=1287$
Средняя квадратичная ошибка расчета притока S, ($\text{м}^3/\text{с}$)	S=563					
Критерий S/ σ	0,710	0,628	0,568	0,520	0,481	0,437

Точность расчета гидрографа притока воды в водохранилище Обской ГЭС (модель А – «снеготаяние – осадки – сток») за последние 4 года (2004, 2005, 2006, 2007) характеризует рис. 3.3.

Оценка точности расчета суммарного притока воды в рассматриваемое водохранилище за апрель– июль (IV, V, VI, VII) характеризуется следующими показателями: стандартная ошибка среднего притока составляет $229 \text{ м}^3/\text{с}$; среднее квадратическое отклонение притока от нормы $484 \text{ м}^3/\text{с}$; **критерий качества расчета 0.474** (качество методики расчета «хорошее»). Та же оценка за второй квартал (апрель-июнь) равна **0.460**.

Долгосрочный прогноз притока за второй квартал может выполняться с применением модели А–«снеготаяние–осадки–сток», путем задания года-аналога, характеризующего ход осадков и температуры воздуха прогнозируемого периода, который подбирается по данным многолетних наблюдений на основе долгосрочного прогноза погоды.



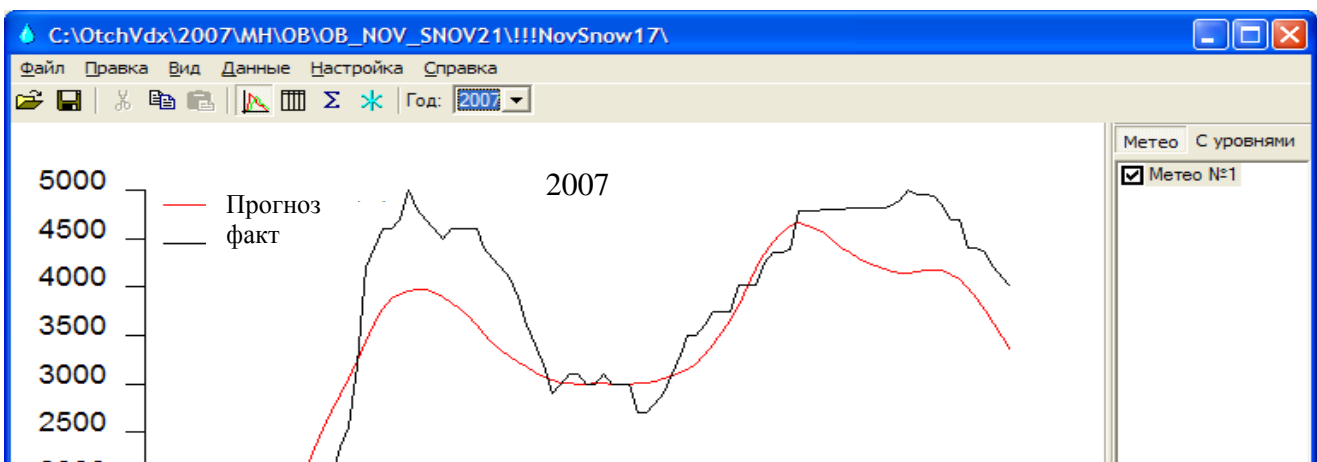
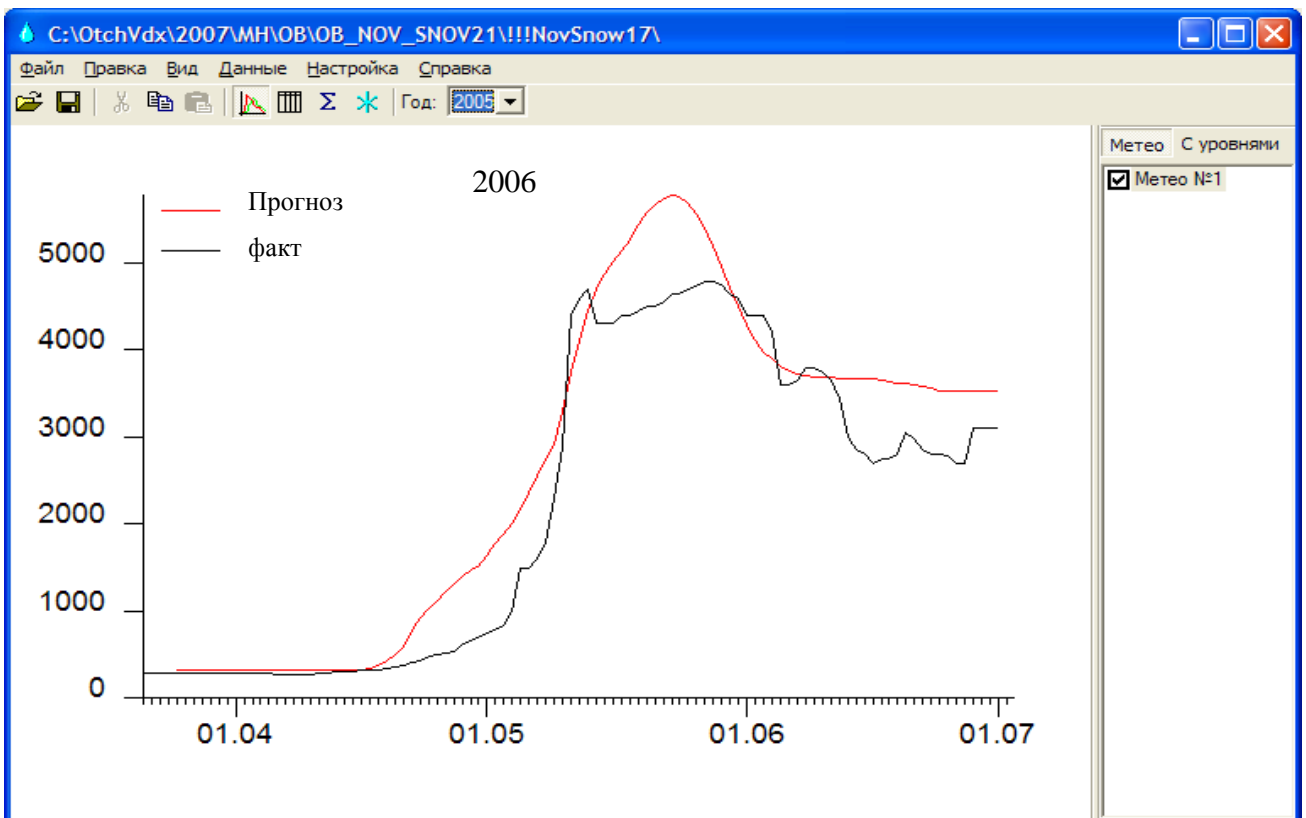


Рисунок 3.3. Рассчитанные и фактические гидрографы притока воды в водохранилище Обской ГЭС по модели А– «снеготаяние-осадки-сток» (уровни воды на реках и приток на момент выпуска прогноза по модели А не учитываются).

Запасы воды в снежном покрове и характеристики водопоглощения задаются по результатам наблюдений: запасы воды в снежном покрове – по мартовским снегосъемкам; показатель осеннего увлажнения – по наблюдениям за стоком воды в осенний период за предшествующий год.

В условиях низкой точности прогноза погоды, в качестве года-аналога можно задать реальный год с характеристиками погоды, близкими к средним многолетним за второй квартал. Так, если принять в качестве среднего года-аналога реальный 1999 год (по ходу суточных осадков и температуры воздуха во втором квартале), то критерий качества долгосрочного прогноза квартального притока по модели составит **0.77** (методика «удовлетворительная»). Для получения оценок точности долгосрочного прогноза притока при различных способах задания года-аналога требуется провести производственные испытания метода.

Рассмотрим точность расчета ежедневного притока воды. В табл. 3.10 приведены для заблаговременности прогнозов 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 суток критерии качества методики расчетов ежедневного притока воды по модели Б (комбинированная модель, учитывающая уровни воды по длине речной системы [см. главе 3 отчета за 2006 г]).

Таблица 3.10

Показатели качества методики расчета ежедневного притока

Δt	Заблаговременность прогноза, сутки	1	2	3	4	5	6	7
σ_{δ}	Средняя квадратичная ошибка прогноза	175	267	314	337	353	373	397

σ	Среднее квадратичное отклонение притока за период Δt	227	400	550	680	793	896	991
σ/σ	Критерий методики, вариант 2007 г, данные за 17 лет, апрель - июль	0.77	0.67	0.57	0.496	0.44	0.42	0.40

Подведем итоги.

В основу рассмотренного варианта модели (модель–2007) положена ежедневная гидрометеорологическая информация за 17 лет и спутниковая информация среднего разрешения (КА «Терра») за последние 4 года. В варианте модели за 1999 год, принятой по результатам испытаний к практическому использованию в 2000 г, для оптимизации параметров использовалась информация за 11 лет наблюдений, причем в некоторые годы данные снегомерных съемок по некоторым пунктам и Коксинскому маршруту отсутствовали. Спутниковые данные для оптимизации модели-1999 имеют разрешение 1 км (КА «NOAA»), существенно уступая по точности данным КА «Терра». Таким образом, последний вариант модели (2007 г) основывается на более качественной информации, а показатели точности расчетов по методике не уступают ранее полученным результатам. На этом основании считаем возможным практическое использование варианта «модель – 2007» в Отделе гидрологических прогнозов Новосибирского ГМЦ без проведения производственных испытаний.

Бассейн Оби отличается сложным строением рельефа и широким диапазоном изменения увлажнения, теплообеспеченности и ландшафтов. Наблюдательная гидрометеорологическая сеть очень редкая, пункты в основном расположены в засушливых долинах и котловинах. Хорошо увлажненные возвышенные горные склоны и водоразделы наблюдениями практически не освещены. В этих условиях дальнейшая работа по усовершенствованию метода должна включать:

- повторную оптимизацию параметров модели после накопления информации спутника «Терра» и данных наземных наблюдений (через 2-3 года);
- включение в модель дополнительных пунктов наблюдений за уровнями воды;
- постановку исследований весеннего стока средних рек в отдельных районах рассматриваемого бассейна для обоснования новых способов оценки показателей водопроницаемости почв;
- 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 долгосроч-

ных прогнозов погоды по методам ГМЦ России, Института Арктики, СибНИГМИ, Иркутского и Красноярского ГМЦ и др.).

Глава 4. Уточнение параметров прогностической модели притока воды в водохранилища Енисейских ГЭС

4.1 Прогноз притока в водохранилище Саяно-Шушенской ГЭС

В [29] дана ландшафтно-гидрологическая характеристика бассейна Верхнего Енисея, представлен список используемых пунктов гидрометеорологических наблюдений, рассмотрено распределение запасов воды в снежном покрове в ландшафтно-гидрологических районах и высотных зонах, обоснована последовательность оптимизации параметров модели прогноза. В [28] представлены результаты оптимизации моделей прогноза для водохранилищ Саяно-Шушенской и Красноярской ГЭС («модель-2006»). Ниже рассмотрим новые результаты, полученные в 2007 г в процессе выполнения настоящей темы, – «модель -2007» для водохранилищ Саяно-Шушенской и Красноярской ГЭС.

Таблица 4.1. Список пунктов наблюдений за атмосферными осадками

Бассейн	Модель-2006	Модель-2007
Саяно-Шушенское водохранилище	1. Оленья Речка (Н=1404) 4. Кызыл (Н=626) 3. Кантегир (Н= 715 м) 4. Сарыг-Сеп (706 м) 5. Артемовск (Н= 473 м) 6. Чадан (832 м) 7. Щетинкино (Н=807 м) 8. Тооро-Хем (Н=920 м)	1. Оленья Речка (Н=1404м) 4. Кызыл (Н=626м) 3. Кантегир (Н= 715 м) 4. Сарыг-Сеп (Н=706 м) 5. Тэли (Н= 880 м) 6. Чадан (Н=832 м) 7. Казыр (Н= 445м) 8. Тооро-Хем (Н=920 м)

Как уже отмечалось в [28], гидрометеорологическая сеть бассейна Саяно-Шушенского водохранилища не освещает снегонакопление, ход температуры воздуха и осадков в наиболее увлажненных среднегорных и высокогорных районах. В связи с этим мы вынуждены использовать данные пунктов наблюдений в бассейне соседнего Красноярского водохранилища (Оленья Речка и др.). Список привлекаемых пунктов в окончательном варианте (модель-2007) практически не изменился, за исключением осадкомерной сети (табл. 4.1). Вместо станций Артемовск и Щетинкино, расположенных в бассейне Красноярского водохранилища, взяты пункты Тэли и Казыр, находящиеся в рассматриваемом бассейне.

Рассмотрим особенности оптимизации параметров модели -2007 для рассматриваемого бассейна. В качестве исходных значений параметров приняты результаты оптимизации по варианту «модель-2006» (см. отчет за 2006 г). Необходимость оптимизации вызвана, во-первых, накоплением новых данных наблюдений спутника Terra за 2007 г, во-

вторых, рассмотренными выше изменениями алгоритма расчета склонового притока, и в третьих – корректировкой списка пунктов осадкомерной сети.

Итак, в основу дальнейшей оптимизации параметров последнего варианта модели положены данные спутниковых наблюдений (КА «Терра») за динамикой площади заснеженности районов бассейна в период снеготаяния в 2004, 2005, 2006 и 2007 гг. С этой целью проводились многовариантные расчеты, критерием которых являлось достижение наилучшего совпадения модельных и спутниковых (КА «Терра») данных о динамике площадей снегового покрытия районов бассейна путем корректировки высотного распределения нормы снегонакопления (см. промежуточный отчет за 2005 г).

Сравнительная оценка динамики заснеженности по данным ИСЗ «Терра» и модельным расчетам после рассмотренного этапа оптимизации представлена в таблице 4.2, из которой следует, что в большинстве случаев получено удовлетворительное совпадение вычисленных и модельных значений снегового покрытия. Отдельные заметные расхождения (например, в районе «Дархадская котловина» 8 апреля 2007 г) следует рассмотреть в последующем на основе новой информации о заснеженности.

Заключительная стадия оптимизация параметров модели (А– «снеготаяние–осадки–сток») проводилась в автоматическом режиме. При этом параметры снегонакопления, снеготаяния и высотные градиенты температуры воздуха в оптимизацию не включаются; оптимизируются только параметры потерь стока и параметры склоновой и русловой трансформации.

Полученные по результатам расчета (модель–2007) средние многолетние характеристики снегонакопления стока за второй квартал по районам и высотным зонам (табл. 4.3.) незначительно отличаются от исходных значений (результаты оптимизации по варианту «модель 2006»). Они учитывают распределение снежного покрова, скорректированное по спутниковой информации (табл. 4.4.).

Перейдем к рассмотрению показателей точности расчетов притока воды в водохранилище Саяно-Шушенской ГЭС за второй и третий кварталы, полученных для заключительного варианта (модель-2007).

Таблица 4.2

Сопоставление «космической» и «модельной» площади снегового покрытия в бассейне водохранилища Саяно-Шушенской ГЭС (в дни с незначительной облачностью)

Дата	Район							
	Север		Юг		Хемчик		<i>Дархатская котловина</i>	
	Заснеженность. %							
космос		модель		космос		модель		
2004г								

17.05	34	29			15	12		
19.05	26	18	15.9	12				
20.05			14.7	9			20.6	24
4.06	8.3	6	6.6	3	4.6	1	11.4	9
5.06	5.8	5			1.6	1	5.9	7
2005г								
24.03	91/100 *)	100						
31.03	73.1/88	85	58.1/68	70				
24.04					37.2	36		
06.05					21.1	17		
09.05					15.1	11		
19.05					13.2	7		
25.05							15.0	13
31.05			10.4	5			14.7	9
2006г								
24.03	82/96	100						
23.04							60/65	79
26.04	78/94	81						
14.05					30	48		
13.05			48	47				
26.05							30	31
1.06					7	12		
4.06	23	23	18	15				
7.06					8	8		
8.06					6	6		
9.06					5	5		
11.06					4	4		
14.06							7	9
13.06			4	4	4	3		
2007г								
6.04	78/94	86						
7.04	77/90	80						
8.04			50	52			49/54	76
23.04	42	42						
24.04	42	40						
25.04			29	29				
26.04	35	35						
4.05					8	6		
5.05							22	27
19.05					4	1		
27.05							10	12
4.06					30	0		
4.06			7	5				

*) **Примечание:** в знаменателе дана «космическая» заснеженность с учетом площади густых темнохвойных лесов (см. отчет за 2006 г).

Нормы снегонакопления и стока по расчетам с применением вариантов моделей за 2006 и 2007 гг

Высота, м	Север				Юг				Хемчик				Дархадская котловина	
	Снегозапас, мм		Сток за 2-3 кв., мм		Снегозапас, мм		Сток за 2-3 кв., мм		Снегозапас, мм		Сток за 2-3 кв., мм		Снегозапас, мм	
	модель 2006	модель 2007	модель 2006	модель 2007	модель 2006	модель 2007	модель 2006	модель 2007	модель 2006	модель 2007	модель 2006	модель 2007	модель 2006	модель 2007
480	0.5	0.5	65	74										
610	7.3	7	67	79	0	0	35	34	0	0	35	34	0	0
914	106	101	104	113	3	3	62	53	1	1	50	42	0	0
1219	176	167	277	271	50	46	125	99	25	24	52	48	49	48
1524	226	220	326	311	129	121	238	146	86	83	82	76	112	107
1829	262	253	374	469	189	178	327	275	100	95	87	82	250	239
2134	301	290	407	221	252	239	480	588	397	177	121	172	353	337
2438					382	268	658	372	456	434	232	178	470	447
2743					306	290	762	298			175	183		
среднее по району	170	163	244	245	108	99	217	185	137	98	85	85	108	104

Таблица 4.4.

Характеристики точности расчета ежедневного притока воды в водохранилище Саяно-Шушенской ГЭС по модели А –«снеготаяние-осадки-сток»

Среднее квадратичное отклонение (σ_i) притока за i суток, ($\text{м}^3/\text{с}$)	$i=4$ $\sigma_5=727$	$i=5$ $\sigma_5=839$	$i=6$ $\sigma_6=932$	$i=7$ $\sigma_7=1010$	$i=8$ $\sigma_8=1078$	$i=9$ $\sigma_9=1138$	$i=10$ $\sigma_{10}=1191$
Средняя квадратичная ошибка расчета притока S , ($\text{м}^3/\text{с}$)	$S=587$						
Критерий S/σ_i	0,808	0,702	0,631	0,583	0,546	0,516	0,492

Таблица 4.5.

Показатели точности модели расчета ежедневного притока в водохранилище Саяно-Шушенской ГЭС (модель Б, учитывающая снеготаяние, осадки, приток и уровни воды в речной системе)

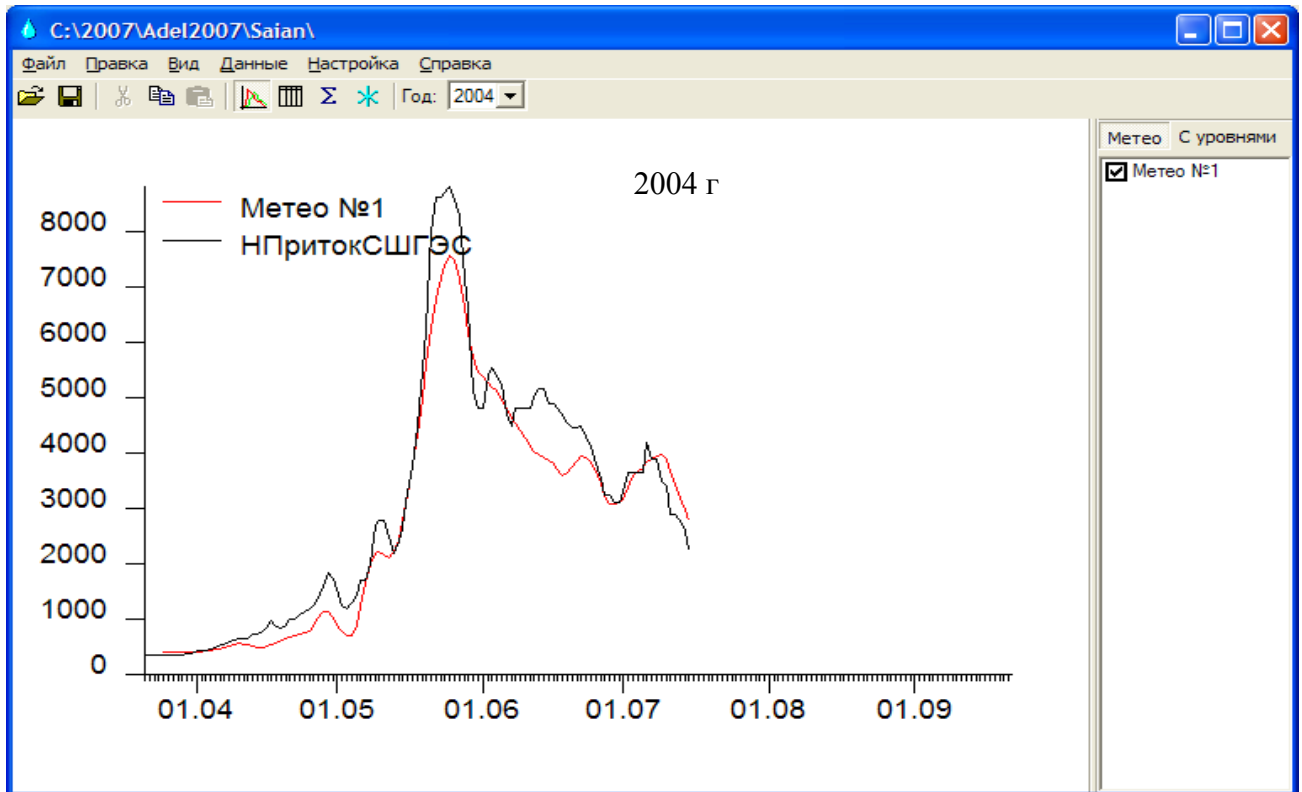
Δt	Заблаговременность прогноза, сутки	1	2	3	4	5	6	7
S	Средняя квадратичная ошибка прогноза, $\text{м}^3/\text{с}$	175	252	322	392	446	480	503
σ	Среднее квадратичное отклонение притока за период Δt , $\text{м}^3/\text{с}$	255	442	596	727	839	932	1010
S/σ	Критерий методики, вариант 2007 г, данные за 21 год, 2-3 квартал	0.685	0.571	0.540	0.540	0.532	0.515	0.498

Сопоставляя данные таблиц 4.4 и 4.5, видим, что модель Б, учитывающая уровни воды в речной системе, показала более высокую точность расчетов для одинаковых значений заблаговременности прогноза. Рассчитанные по модели А и наблюдаемые гидрографы притока приведены на рис. 4.1.

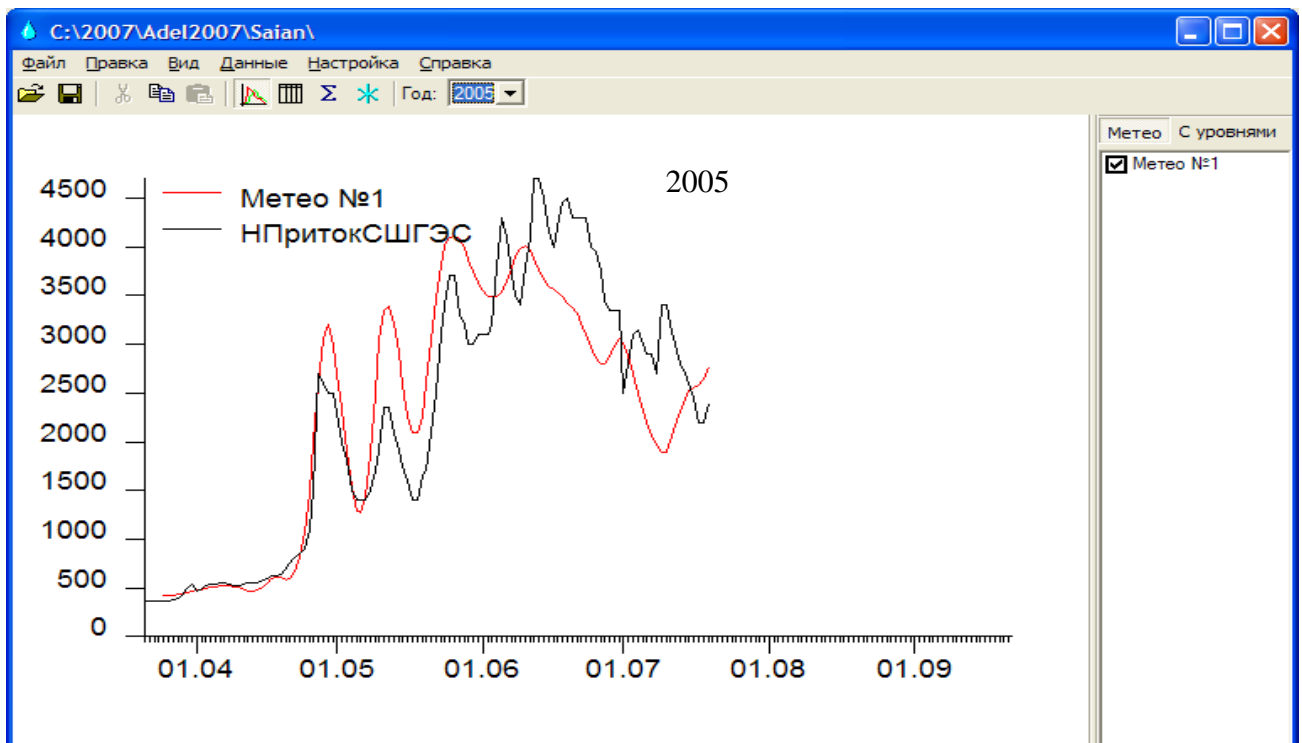
Расчеты суммарного притока за второй квартал характеризуются средней квадратичной ошибкой $S = 263 \text{ м}^3/\text{с}$ при среднем квадратичном отклонении $\sigma = 471 \text{ м}^3/\text{с}$ ($S/\sigma = 0,56$). Те же показатели для третьего квартала дают $S = 337 \text{ м}^3/\text{с}$, $\sigma = 563 \text{ м}^3/\text{с}$ ($S/\sigma = 0,56$).

В целом качество методики расчета оценивается как удовлетворительное. Такая оценка соответствует недостаточной репрезентативности исходных данных, которые характеризуют в основном степные или лесостепные ландшафты в речных долинах и не освещают горные склоны и водораздельные участки.

Качеству прогноза притока ниже посвящен отдельный раздел.



— расчет
— факт



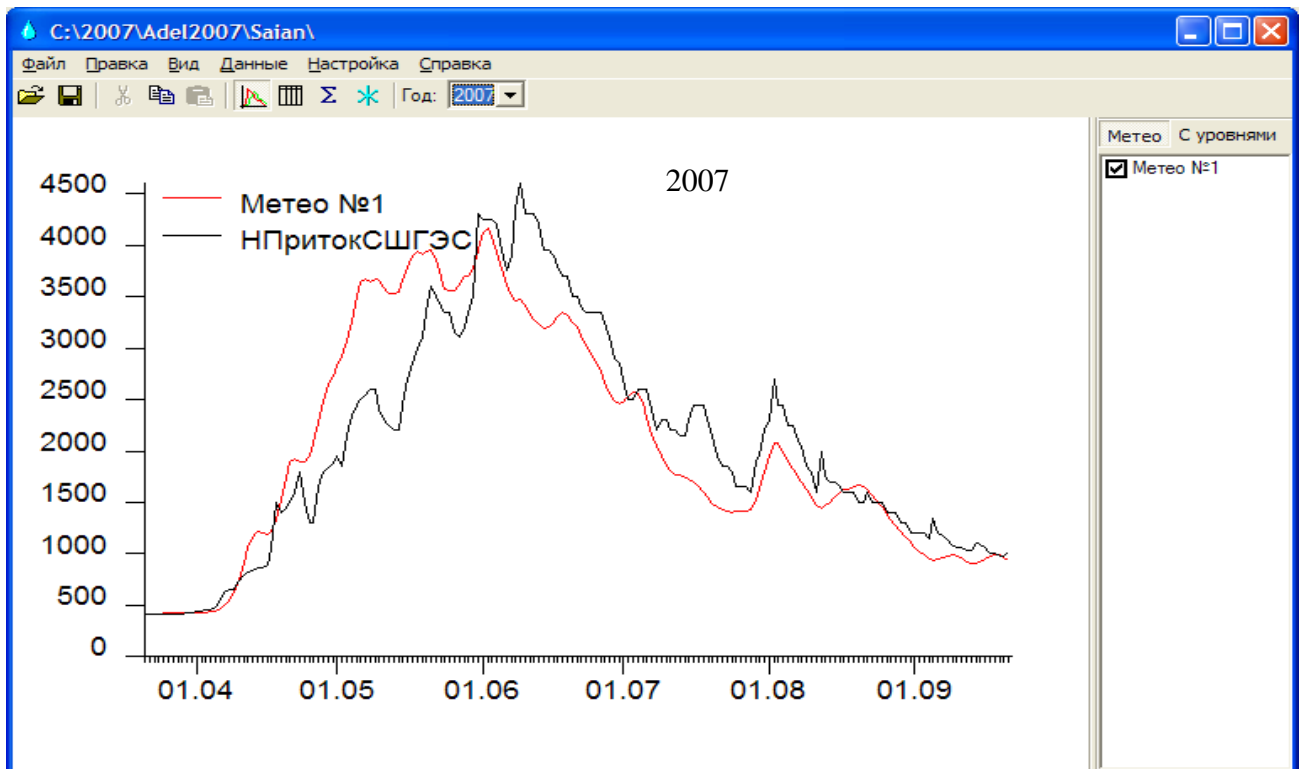
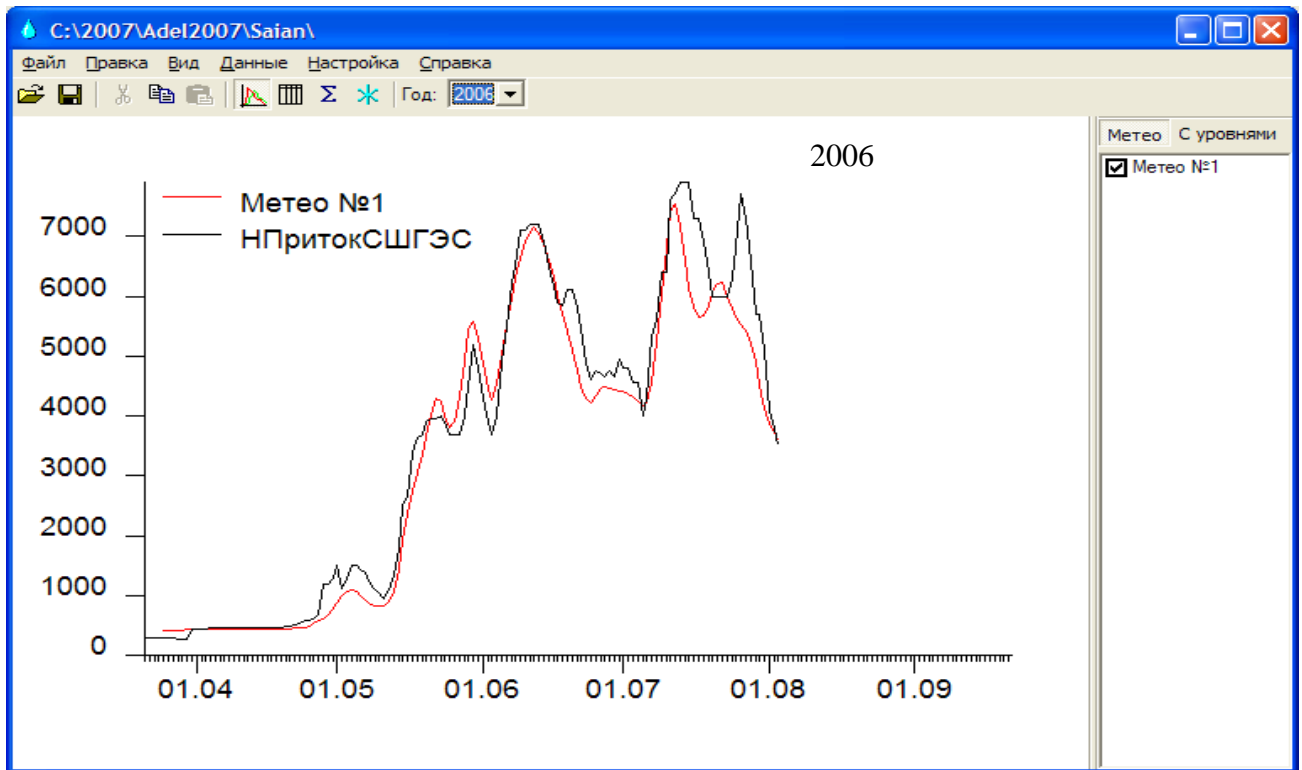


Рис. 4.1. Рассчитанные по модели А («снеготаяние, осадки, сток») и фактические гидрографы притока воды в водохранилище Саяно-Шушенской ГЭС за 2004, 2005, 2006, 2007 гг.

4.2 Прогноз бокового притока в водохранилище Красноярской ГЭС

Заключительный вариант модели прогноза бокового притока в водохранилище Красноярской ГЭС («модель-2007»), как и в случае Саяно-Шушенской ГЭС, использует для оптимизации параметров новую информацию о динамике заснеженности за 2007 год и учитывает нелинейный вид зависимости притока в русловую сеть от динамического запаса воды на склонах.

Список привлекаемых гидрометеорологических пунктов практически не изменился, кроме осадкомерной сети (табл. 4.6), где вместо информации станций Тооро-Хем и Чадан (расположены за пределами бассейна) используются данные осадкомеров Казыра и Беи.

Бассейн	Модель-2006	Модель-2007
Красноярского водохранилища	1. Оленья Речка (Н= 1404 м) 4. Курагино (Н= 284 м) 3. Неожиданный Прииск (Н=527 м) 4. Тооро-Хем (Н=920 м) 5. Артемовск (Н= 473 м) 6. Чадан (832 м) 7. Щетинкино (Н=807 м)	1. Оленья Речка (Н= 1404 м) 4. Курагино (Н= 284 м) 3. Неожиданный Прииск (Н=527 м) 4. Казыр (Н= 445м) 5. Артемовск (Н= 473 м) 6. Бей (Н=468 м) 7. Щетинкино (Н=807 м)

Отметим, что почти все принятые в расчет пункты располагаются в бассейне водохранилища Красноярской ГЭС. В этом бассейне расположена единственная в Саянах высокогорная станция Оленья Речка (Н= 1404 м).

Последовательность оптимизации параметров модели не отличается от таковой для рассмотренного выше бассейна Саяно-Шушенского водохранилища.

Таблица 4.7.

Сопоставление «космической» и «модельной» площади снегового покрытия (в дни с незначительной облачностью) 2007 г.

Дата	Район							
	Туба		Абакан		Поле		<i>Лесостепь</i>	
	Заснеженность, %							
	космос	модель	космос	модель	космос	модель	космос	модель
2004г								
17.05	53.0	49	29.4	38	0.7	0	13.7	3
18.05	47.8	45	21.5	35	0	0	5.0	2
19.05	39.2	41	19.5	32			3.6	2
20.05	40.9	38	17.6	29			4.0	1
4.06	21.0	16	3.9	12			0.2	0
2005								
31.03	76.0/100 *)	98	63.7/81	98	38.9	11	71	93

ние (σ_i) притока за i суток, ($\text{м}^3/\text{с}$)	$\sigma_4=904$	$\sigma_5=1041$	$\sigma_6=1149$	$\sigma_7=1238$	$\sigma_8=1314$	$\sigma_9=1380$	$\sigma_{10}=1439$
Средняя квадратичная ошибка расчета притока S , ($\text{м}^3/\text{с}$)	$S=577$						
Критерий S/σ	0,638	0,554	0,502	0,466	0,439	0,418	0,401

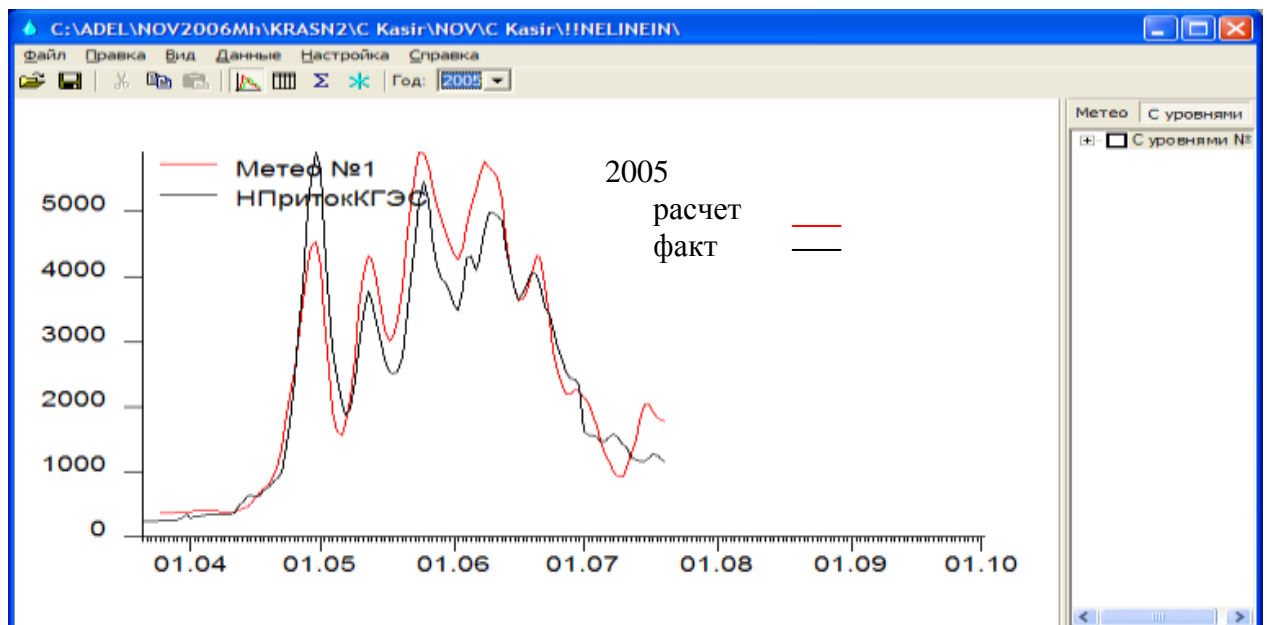
Таблица 4.9.

Показатели точности расчета бокового притока в водохранилище Красноярской ГЭС (модель Б, учитывающая снеготаяние, осадки, приток в водохранилище и уровни воды в речной системе)

Δt	Заблаговременность прогноза, сутки	1	2	3	4	5	6	7
S	Средняя квадратичная ошибка расчета, $\text{м}^3/\text{с}$	129	227	321	408	467	504	524
σ	Среднее квадратичное отклонение притока за период Δt , $\text{м}^3/\text{с}$	279	525	734	904	1041	1149	1238
S/σ	Критерий методики, вариант 2007 г., данные за 22 года, 2-3 квартал	0.46	0.43	0.44	0.45	0.45	0.44	0.42
S/σ	Критерий методики, вариант 2006 г., данные за 22 года, 2-3 квартал	0.52	0.45	0.45	0.46	0.45	0.44	0.42

Расчеты суммарного притока за второй квартал (апель-июнь) характеризуются средней квадратичной ошибкой $S = 201 \text{ м}^3/\text{с}$ при среднем квадратичном отклонении $\sigma = 568 \text{ м}^3/\text{с}$ ($S/\sigma = 0,56$).

Степень совпадения рассчитанных по модели А и наблюдаемых гидрографов бокового притока иллюстрирует рис. 4.4.



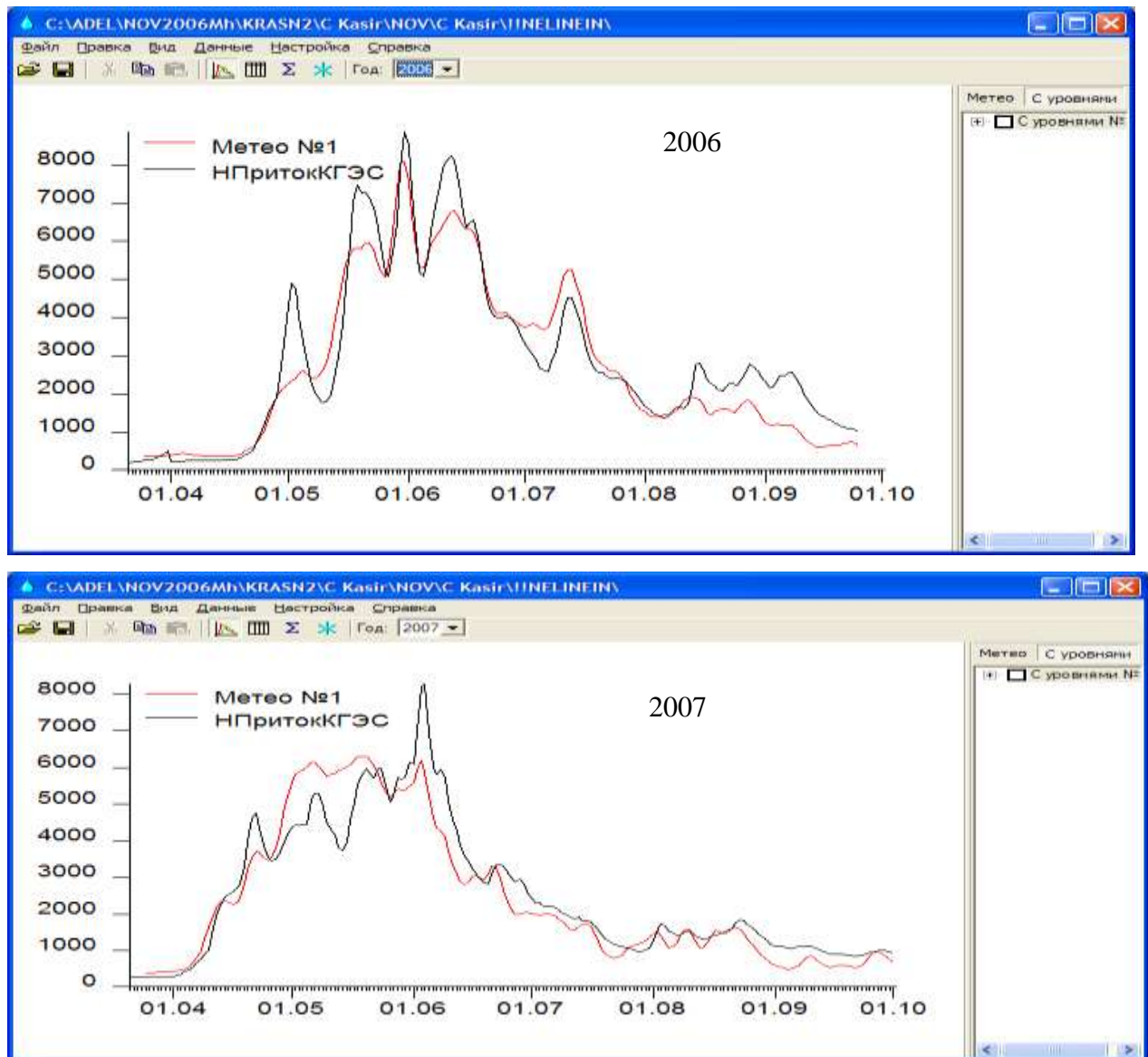


Рисунок 4.4. Рассчитанные по модели А («снеготаяние, осадки, сток») и фактические гидрографы бокового притока воды в водохранилище Красноярской ГЭС за 2005, 2006, 2007 гг.

4.3. Оценка точности прогнозов притока воды в водохранилища Енисейских ГЭС

Программное обеспечение, разработанное на основе рассмотренной выше гидролого-математической модели, позволяет путём численных экспериментов моделировать величины речного стока и ежедневного притока воды в водохранилища ГЭС. 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 краткосрочных прогнозах для задания неизвестной метеорологической информации используются кратко- и среднесрочные прогнозы погоды.

В 2007 г в отделе гидрологических прогнозов Красноярского Гидрометцентра в оперативном режиме выдавались краткосрочные прогнозы притока воды в водохранилища Енисейских ГЭС по модели -2006.

Прогноз рассчитывался на специально разработанной для пользователя программе, реализуемой на ПЭВМ. Начиная с первой декады марта ежедневно, либо с перерывами по мере необходимости, в память компьютера вводится ежедневная гидрометеорологическая информация (по данным наблюдений) и прогностическая, на период заблаговременности прогноза (на 1-6 суток). Уровни воды и средний суточный приток воды учитываются на дату выпуска прогноза и предшествующие сутки. Результат прогноза, - ежедневный приток воды в водохранилище с заблаговременностью 1-7 суток.

В процессе испытаний было выпущено по 170 краткосрочных прогнозов с различной заблаговременностью для Красноярского и Саяно-Шушенского водохранилищ. Качество выпущенных краткосрочных прогнозов оценивалось отношением средней квадратичной ошибки прогноза в 2007 году к среднему квадратичному отклонению притока за период заблаговременности прогноза. Значения критериев качества прогноза представлены в табл. 4.10 и 4.11.

Результаты прогнозов показали хорошее качество.

Специфика применения математических моделей для детерминистического **долгосрочного прогноза** объема и гидрографа весеннего половодья связана с тем обстоятельством, что решение задачи с увеличением заблаговременности прогноза все в большей степени зависит от будущей погоды, которая достоверно не известна на момент выпуска прогноза. За период заблаговременности суточный ход метеорологических элементов задается:

- с использованием метеорологических данных среднесрочного прогноза погоды и данных года-аналога. Выбор аналога производится с учетом долгосрочных прогнозов погоды;
- в осредненном виде по данным многолетних наблюдений.

Таблица 4.10

Оправдываемость краткосрочных прогнозов притока воды в водохранилище Красноярской ГЭС в 2007 г.

Заблаговременность прогноза притока, сутки	Средняя квадратичная ошибка прогноза притока, $S \text{ м}^3/\text{с}$	Критерий качества прогноза, S/σ	Оправдываемость прогноза, %
	141	0,50	89
2	266	0,50	87
3	438	0,59	82
4	634	0,69	78
5	763	0,72	76

6	830	0,71	77
7	862	0,69	77

Таблица 4.11

Оправдываемость краткосрочных прогнозов притока воды в водохранилище Саяно-Шушенской ГЭС в 2007 г.

Заблаговременность прогноза притока, сутки	Средняя квадратичная ошибка прогноза притока, $S \text{ м}^3/\text{с}$	Критерий качества прогноза, S/σ	Оправдываемость прогноза, %
1	140	0,54	84
2	200	0,45	86
3	259	0,43	88
4	306	0,42	89
5	344	0,41	89
6	372	0,40	89
7	402	0,39	89

Прогноз на второй квартал с использованием года-аналога выдавался следующим образом.

Соответствующее программное обеспечение позволяет путем численных экспериментов в модели получить величины притока при различных ситуациях будущей погоды, и, следовательно, на основе электронной базы данных многолетних (с 1979 года) рассчитать ожидаемый приток при различном характере весенне-летнего периода.

В конце марта был выпущен долгосрочный прогноз на второй квартал. Использовались данные снегомерных съемок на 20 марта и показатель предзимнего увлажнения бассейна. Суточный ход температуры воздуха и осадков задается по данным наблюдений лет-аналогов. Год-аналог выбирался с привлечением долгосрочных прогнозов погоды института Арктики и Антарктики, Иркутского Гидрометцентра, а также сезонного прогноза погоды Красноярского ГМЦ. Анализ этой информации с учетом текущей погодной ситуации позволил наметить вероятный сценарий развития весны.

В табл. 4.13 представлены результаты долгосрочного прогноза осадков и температуры воздуха на 2 квартал 2007г. Дата выпуска прогноза 29 марта. Год-аналог для апреля был выбран из базы данных исходя из месячного прогноза Иркутского ГМЦ. Годы-аналоги для мая, июня были выбраны исходя из сезонного прогноза Красноярского ГМЦ.

Качество результатов долгосрочных прогнозов на 2 квартал 2007г (оценивается по соотношению фактической и допустимой ошибки прогноза) представлено в табл. 4.14.

Прогноз на 2 квартал оправдался для водохранилища Красноярской ГЭС и не оправдался для водохранилища Саяно-Шушенской ГЭС. Вероятно, последнее можно объяснить неточностью в выборе аналогов, так как по сезонный прогноз погоды Красноярского ГМЦ выпускаемый для южных районов Красноярского края, был распространен на территорию Республики Тыва. Следует также учесть и более низкие показатели качества прогноза для Саяно-Шушенского водохранилища.

Таблица 4.14.

Оправдываемость долгосрочных прогнозов притока воды в водохранилище
Красноярской ГЭС на II, III квартал в 2007г

Даты выпуска прогноза 29 марта.

Водохранилище	Красноярское	Саяно-Шушенское
Фактический приток за 2 кв., м ³ /с	3930	2550
Годы-аналоги	IV- 1992; V-1997; VI- 2002	
Приток по прогнозу (модель-2006), м ³ /с	3787	2982
Ошибка прогноза, м ³ /с	-143	432
Допустимая ошибка, м ³ /с	370	320
Результат прогноза	оправдался	не оправдался

На рис.4.3 представлен ход ежедневного притока: фактический и по результатам долгосрочного прогноза на второй квартал в водохранилище Красноярской ГЭС. При этом ход суточных температур воздуха и осадков приняты за годы аналоги, указанные в таблице 4.14.

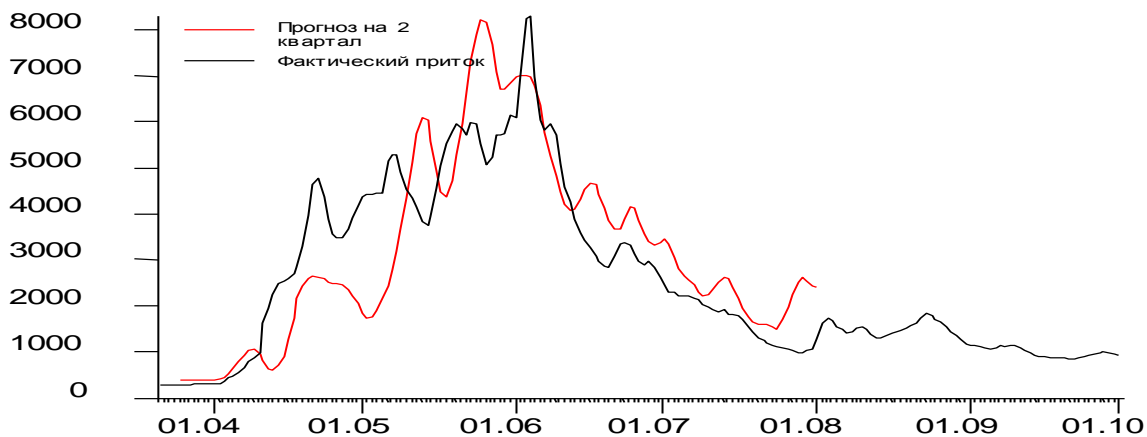


Рисунок.4.3 Ход ежедневного притока фактический и по результатам долгосрочного прогноза на второй квартал в водохранилище Красноярской ГЭС

Результаты долгосрочного прогноза осадков и температуры воздуха
на второй квартал 2007г для южных районов Красноярского края

Месяц	Сезонный прогноз (методика В.В. Еремина)		Прогноз Иркутского ГМЦ			Факт	
	Температура	Осадки	Температура	Осадки	Год-аналог	Температура	Осадки
Апрель	Норма и выше	Ниже нормы	Норма и ниже	Выше нормы	1992	Выше нормы	Ниже нормы
Май	Выше нормы	Норма и ниже	Норма	Норма и выше	1991	Выше нормы	Выше нормы
Июнь	Выше нормы	Выше нормы	Норма и ниже	Норма и выше	1998	Ниже нормы	Выше нормы

На начало каждого месяца и декады выпускался прогноз притока, основывающийся на данных краткосрочного прогноза погоды и на данных лет-аналогов, принятых для соответствующего месяца. Результаты месячных и декадных прогнозов притока воды представлены в табл. 4.14, 4.15.

Можно отметить низкую оправдываемость прогнозов на апрель (объясняемую не оправдавшимся прогнозом апрельской погоды) и высокую – на спаде половодья и в межженный период.

Таблица 4.14

Оправдываемость долгосрочного прогноза притока воды в водохранилище Красноярской ГЭС на декаду и месяц в 2007г

Месяц	Декада	Год-аналог	Факт	Прогноз по модели по году-аналогу		
				Прогноз	Ошибка	
Апрель	1	1992	614	807	193	+
	2		2630	2446	-184	+
	3		3990	3982	-8	+
	месяц		2410	1583	-827	-
Май	1	1991	4740	6436	1696	-
	2		4670	5979	1309	-
	3		5700	4052	-1648	-
	месяц		5040	4887	-153	+
Июнь	1	1998	6510	4239	-2271	-
	2		3470	2518	-952	+
	3		3050	3052	2	+
	месяц		4340	3219	-1121	-
Июль	1	1999	2190	2086	-104	+
	2		1710	1480	-230	+
	3		1070	1024	-46	+
	месяц		1660	1388	-272	+
Август	1	1999	1520	1441	-79	+
	2		1420	1356	-64	+
	3		1550	1620	70	+
	месяц		1500	981	-519	-
Сентябрь	1	2006	1100	788	-312	+
	2		935	802	-133	+
	3		934	670	-264	+
	месяц		990	691	-299	+
Оправдываемость декадных прогнозов, %				78		
Оправдываемость месячных прогнозов, %				50		

Примечание: + прогноз оправдался; – не оправдался.

Таблица 4.15

Оправдываемость долгосрочного прогноза притока воды в водохранилище Саяно-Шушенской ГЭС на декаду и месяц в 2007г

Месяц	Декада	Год-аналог	Факт	Прогноз по модели по году-аналогу		
				Прогноз	Ошибка	
Апрель	1	1992	550	497	-53	+
	2		1050	1399	349	-

	3		1620	2177	557	-
	месяц		1070	692	-378	-
Май	1	1991	2340	3716	1376	-
	2		2640	3994	1354	-
	3		3440	3906	466	+
	месяц		2810	3358	548	-
Июнь	1	1998	4180	4141	-39	+
	2		3930	3379	-551	+
	3		3240	3397	157	+
	месяц		3780	3771	-9	+
Июль	1	1999	2470	2849	379	+
	2		2280	2391	111	+
	3		1820	1809	-11	+
	месяц		2190	2335	145	+
Август	1	1999	2220	2304	84	+
	2		1670	1794	124	+
	3		1420	1579	159	+
	месяц		1770	1761	-9	+
Сентябрь	1	2006	1170	1024	-146	+
	2		1040	944	-96	+
	3		1000	-		
	месяц		1070	-		
Оправдываемость декадных прогнозов, %			76			
Оправдываемость месячных прогнозов, %			60			

В практике долгосрочных гидрологических прогнозов суточный ход метеорологических элементов за период заблаговременности может быть задан в осредненном виде. В этом случае можно подобрать год-аналог, у которого ход осадков во втором квартале близок к среднему многолетнему. Для прогноза бокового притока воды в водохранилище Красноярской ГЭС лучшие результаты за многолетний период получены при использовании ежедневных метеорологических данных за второй квартал 1985 года ($S=343 \text{ м}^3/\text{с}$, $\sigma=568 \text{ м}^3/\text{с}$, $S/\sigma=0.60$). Для водохранилища Саяно-Шушенской ГЭС в качестве аналога рекомендуется 1984 год ($S=350 \text{ м}^3/\text{с}$, $\sigma=471 \text{ м}^3/\text{с}$, $S/\sigma=0.74$).

Выше мы рассмотрели результаты прогноза притока воды в водохранилища Енисейского каскада ГЭС на основе модели-2006. В связи с тем, что последний вариант (модель – 2007) учитывает спутниковую информацию за 4 года, использует репрезентативный набор пунктов наблюдений за осадками, и дает несколько лучшие оценки качества, он может быть рекомендован к практическому применению.

Глава 5. Долгосрочный прогноз максимальных уровней воды с учетом возможных заторов льда (реки Томь - Томск, Енисей - Назимово, Енисей - Ярцево)

В основу метода положены исследования Л.Г. Шуляковского, показавшего возможность использования для этой цели регрессионных моделей, учитывающих факторы, наиболее полно характеризующие условия формирования максимальных уровней воды [4]. Ниже рассмотрим результаты реализации этого подхода на участках реки Енисей – Назимово, Енисей – Ярцево.

Необходимо выделить несколько основных моментов формирования максимального (заторного) уровня воды на Сибирских реках:

- 1- снегонакопление в бассейне, как основной показатель водности;
- 2 -пропускная способность русла на момент вскрытия;
- 3- прочность и толщина льда;
- 4- характер весны (температура воздуха, влагообеспеченность в марте-апреле);
5. расстояние до плотины ГЭС (для р. Енисей).

После создания на Енисее высоконапорной плотины Красноярской ГЭС, в нижнем бьефе ежегодно образуется полынья длиной от 60 до 300 км. Одним из комплексных показателей теплового состояния реки является температура воды ниже плотины, а также расстояние до кромки ледостава, либо величина продвижения кромки льда за некоторый фиксированный период времени. В пунктах, расположенных на небольшом расстоянии от кромки, установление ледостава происходит значительно позже, а вскрытие – раньше. Сроки наступления и продолжительность ледостава в этих пунктах является репрезентативными комплексными гляцио-гидрологическими показателями.

Для разработки методик прогноза максимальных уровней сначала подбирались оптимальные уравнения для обобщенных параметров, характеризующих условия формирования максимальных уровней. Они представляют линейные комбинации соответствующих гидрометеорологических предикторов, измеряемых в пунктах наблюдений гидрометеорологической сети. К ним относятся: 1) характеристика толщины льда и изменение толщины льда по длине участка реки; 2) показатель теплозапасов почвы; 3) показатели температуры воздуха в марте и апреле; 4) показатели влагообеспеченности (количества осадков) апреля или марта-апреля; 5) показатель снегонакопления; 6) осенний сток. Набор этих предикторов определяется сначала из физических соображений. Далее проверяется их репрезента-

тивность на основе корреляции с максимальными уровнями воды. В качестве предикторов использовались:

- Запасы воды в снеге в пунктах наблюдений, характеризующие количество поступившей на водосбор талой воды.
- Количество весенних осадков отражает дополнительное поступление воды и косвенно, – влажность воздуха и потери воды на испарение.
- Осенний сток характеризует запасы влаги и льдистость почвы к моменту начала снеготаяния, либо водность реки в период замерзания и пропускную способность русла.
- Положение кромки ледостава зимой и максимальная толщина льда указывают на объем льда, его прочность и предопределяет заторность реки в период вскрытия.
- Уровень воды на дату появления ледовых образований или на дату установления ледостава, минимальный и максимальный уровни за зимний период, а также превышение максимального уровня над уровнем воды на момент установления ледостава, – отражают ледовые условия, наличие зажоров льда в зимний период и пропускную способность русла.
- Изменение уровня воды в марте – начале апреля является комплексным показателем тенденции процессов, происходящих в бассейне и русле перед вскрытием.

Итак, линейные комбинации перечисленных предикторов и есть соответствующие обобщенные показатели. Весовые коэффициенты в этих комбинациях определяются на основе множественной корреляции отобранных предикторов с максимальным уровнем воды. Далее вычисляются значения всех обобщенных показателей за каждый год и путем множественной регрессии устанавливаются линейные зависимости между обобщенными показателями и максимальными уровнями воды. Это и есть искомые уравнения для прогнозов. Предложенный путь позволяет использовать преимущества физического подхода (на этапе «конструирования» обобщенных показателей) и объективного статистического анализа (на этапе получения прогностических уравнений).

Конкретный набор предикторов и вид регрессионных уравнений индивидуален для каждого участка реки в связи с различием условий образования заторов льда. В расчетах использовались данные наблюдений с 1974 по 2004 гг.

Методика прогноза максимального уровня воды р. Томи у г. Томска

На протяжении последних пятидесяти лет на р. Томи в районе г. Томска производится добыча песчано-гравийной смеси. До 1985 года прослеживается чёткий тренд, вы-

ражающийся в снижении уровня воды (рис. 4.1). Особенно четко он выражен для уровня воды на дату установления ледостава и минимального зимнего уровня воды. С 1986 года, когда интенсивная добыча гравийно-песчаной смеси производится существенно выше по течению реки, наблюдается незначительная тенденция тренда в сторону увеличения уровней воды, связанная, по-видимому, с компенсирующими процессами в русле реки (увеличения островов и т.д.).

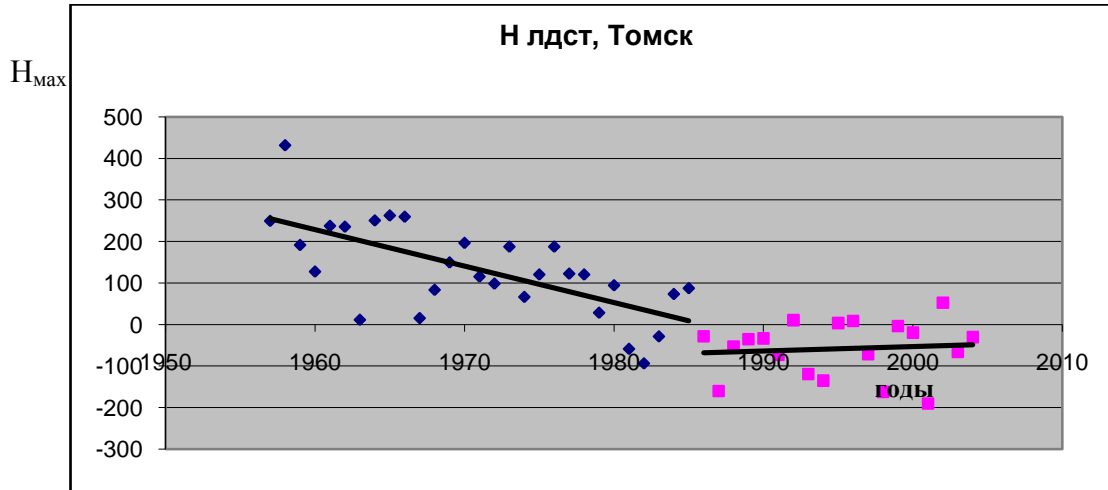


Рис. 4.1 Изменение уровней воды р. Томи у г. Томска на дату установления ледостава

Максимальные уровни р. Томи у г. Томска нередко связаны с заторами льда. Они формируются в апреле при прохождении первой, либо второй волны половодья. Уравнение для прогноза максимальных уровней р. Томи у г. Томска (H_{Tmax}), включает следующие предикторы и обобщенные показатели: запас воды в снеге на 31 марта, Кузедеево; температура почвы за февраль на глубине 08 м, Киселевск; изменение уровня воды за вторую и третью декады марта в районе г. Томска; изменение уровня воды за третью декаду марта р. Томь – с. Козюлино, расположенного в 30 км от устья – зона влияния подпора Оби; температура воздуха за первую и вторую декады апреля, Томск; осадки за вторую декаду апреля, Междуреченск.

Средняя дата наступления H_{Tmax} – 5 мая; крайние – 17 апреля (2000), 4 июня (1975).

1. Уравнение для выпуска прогноза в конце третьей декады марта (предварительный прогноз):

$$H_{Tmax} = 0.597 * S_T - 16.978 * t_{II} - 2.055 * H_{I3} + 523,217, \quad (5.1)$$

показатели точности: $R = 0.777$, критерий качества прогноза $S/\sigma = 0.656$;

2. Уравнение для выпуска прогноза в конце третьей декады марта, с учетом выраженного в отдельные годы подпорного влияния Оби, (обобщенный показатель H_3):

$$H_{Tmax}=0.670*S_T - 17.597*t_{п}- 1.653*H_2+ 1,172*H_3 + 499,476 \quad (5.2)$$

показатели точности: $R = 0.806$, критерий качества прогноза $S/\sigma = 0.625$;

3. Уравнение для выпуска прогноза в конце второй декады апреля, с учетом температуры воздуха за первую и вторую декады апреля:

$$H_{Tmax}=0.630*S_T-15.306*t_{п}-2.206*H_1-14,273*T_1+527,982, \quad (5.3)$$

показатели точности: $R = 0.872$, критерий качества прогноза $S/\sigma = 0.525$;

4. Уравнение для уточнения прогноза в конце второй декады апреля, учитывающее осадки, выпавшие за вторую декаду апреля, в случае когда дождевой паводок накладывается на интенсивное снеготаяние (1997, 2004 гг и др.) :

$$H_{Tmax}=0.700*S_T-16.301*t_{п}-2.360*H_1-13,536*T_1+1,105*X_1+494,098,$$

(5.4)

показатели точности: $R = 0.894$, критерий качества прогноза $S/\sigma = 0.491$;

Таблица 5.1

Описание переменных и обобщенных показателей в уравнении (5.1) и (5.2)

Обозначение	Смысловое значение	Г– статистика, формулы (1);(2);(3); (4)
S_T	Показатель снегонакопления, где S_T – запас воды в снеге на 31 марта, Кузедеево;	4,1; 4,7; 4,8; 6,2
$t_{п}$	Температура почвы за февраль на глубине 0,8 м, Киселевск; характеризует запасы влаги и льдистость почвы к моменту начала снеготаяния, а также суровость зимы - косвенно прочность и толщину льда.	-4,5; -4,9; -4,7; -5,5
T_1	Средняя температура воздуха за первую и вторую декады апреля, Томск	-3,8; -4,7
H_1	$H_1 = 0,4*(H_{20.03} - H_{10.03}) + 0,6*(H_{31.03}-H_{20.03})$, сумма изменения уровня воды за вторую и третью декады марта с учетом весовых коэффициентов, р. Томь – г. Томск	-3,3; -4,1; -4,2
H_2	$H_2 = (H_{20.03} - H_{10.03}) + (H_{31.03}-H_{20.03})$, сумма изменения уровня воды за вторую и третью декады марта, р. Томь – г. Томск	-4,0
H_3	$H_3 = (H_{31.03}-H_{20.03})$, изменение уровня воды третью декаду марта, р. Томь – с. Козюлино	2,6
X_1	X_1 – сумма осадков за вторую декаду апреля, Междуреченск	3,3

Уточненный прогноз, рассчитанный по формулам (5.2), (5.3), (5.4), выбираем с учетом сложившихся особенностей весны.

Результаты прогнозов максимальных уровней воды на независимом материале р. Томь – г. Томск представлены в таблице 5.2. Прогноз за 2006 и 2007 гг. был рассчитан в оперативном режиме.

Таблица 5.2

Результаты долгосрочных прогнозов максимальных уровней воды р. Томь – г. Томск в 2005 и 2006 гг. (допустимая ошибка прогноза 66 см)

Фактический H_{\max}			№ формулы	Прогноз					
				2005		2006		2007	
2005	2006	2007		H_{\max}	Ошиб-ка	H_{\max}	Ошиб-ка	H_{\max}	Ошиб-ка
633	708	681	1	571	66	617	91	664	17
			2	582	55	686	22		
			3	576	61	706	2		
			4	567	66	714	-6		

Исключительным был 2004 год. В бассейне верхнего течения р. Томи наблюдались аномальные условия весенней погоды. В период с 13 по 16 апреля выпало необыкновенно высокое количество осадков (Кузедеево – 82 мм; Междуреченск –95 мм; Кондома –146 мм; Усть-Кабырза –182 мм). В этот период в лесах еще сохранились 70-100 % накопленного за зиму снега, а на открытых участках в речных долинах снеговое покрытие территории составляло 20-60%. Среднесуточная температура воздуха во время выпадения осадков и в последующую декаду составляла от -3 до +7 градусов, поэтому выпал снег с дождем. У Томска 18 апреля наблюдался затор льда. В момент, предшествующий его прорыву, уровень воды поднялся на 3 м и достиг высоты 585 см над нулем графика поста. Затем, после непродолжительного спада, последовал новый подъем уровней воды вследствие добегаания снегодождевой волны паводка, сформированного рассмотренными выше осадками (13-16 апреля), выпавшими в бассейне верхнего течения р. Томи. Несмотря на относительно низкие температуры, сформировалась высокая снегодождевая волна паводка. Высокий приток в русловую сеть в это время формировался в основном с безлесных участков, занимающих примерно 20% площади водосбора с высотными отметками ниже 400-600 м. Снегодождевой паводок в Томске достиг максимума 22 апреля (**768 см**). Долгосрочный прогноз максимального уровня воды по этому створу почти совпал с высотой первого (заторного) подъема (617 см).

Выпавшие осадки учтены в уточняющем прогнозе максимальных уровней воды ($H_{\text{нmax}}$ прогноз = **728** см), уравнение (5.4).

Уравнения для прогноза максимального уровня воды р. Енисей - с. Назимово ($H_{\text{нmax}}$)

Село Назимово находится на 178 км ниже г. Енисейска и 445 км ниже Красноярской ГЭС. Р.Енисей - Назимово вскрывается, как правило, позднее, иногда на целый месяц (1983), чем в Енисейске, или одновременно (1997). Наступление максимального уровня в этих створах может происходить одновременно (1979, 2003, 2004, 2006), или в Назимово гораздо раньше (1982, на 27 дней), или намного позже (1983, на 55 дней), чем в Енисейске. Средняя дата наступления $H_{\text{нmax}}$ – 9 мая; крайние - 14 апреля (1981), 25 мая (1989).

Уравнения для прогноза максимального уровня воды ($H_{\text{нmax}}$) в конце третьей декады марта:

Уравнение 5.5:

$$H_{\text{нmax}} = 3.603 \cdot S_1 + 4.388 \cdot h_1 - 0.136 \cdot \Delta Q_1 + 0.123 \cdot Q_2 - 0.319 \cdot \Delta \Delta H_2 - 477.520,$$

показатели точности: $R = 0.880$, критерий качества прогноза: $S/\sigma = 0.516$.

Уравнение 5.5 а:

$$H_{\text{нmax}} = 3.707 \cdot S_1 + 181.797 \cdot C_1 - 0.155 \cdot \Delta Q_1 + 0.117 \cdot Q_2 - 0.291 \cdot \Delta \Delta H_2 - 222.032,$$

показатели точности: $R = 0.906$, критерий качества прогноза: $S/\sigma = 0.460$.

Уравнения для прогноза максимального уровня воды ($H_{\text{нmax}}$) в конце третьей декады апреля (учитывается характер погоды в апреле):

Уравнение 5.6:

$$H_{\text{нmax}} = 3.603 \cdot S_2 + 4.388 \cdot h_1 - 0.136 \cdot \Delta Q_1 + 0.123 \cdot Q_2 - 0.319 \cdot \Delta \Delta H_2 - 477.520,$$

показатели точности: $R = 0.880$, критерий качества прогноза: $S/\sigma = 0.516$

Уравнение 5.6 а:

$$H_{\text{нmax}} = 3.707 \cdot S_2 + 181.797 \cdot C_1 - 0.155 \cdot \Delta Q_1 + 0.117 \cdot Q_2 - 0.291 \cdot \Delta \Delta H_2 - 222.032,$$

показатели точности: $R = 0.906$, критерий качества прогноза: $S/\sigma = 0.460$.

Приведем описание переменных и обобщенных показателей в приведенных уравнениях:

Таблица 5.3

Описание переменных и обобщенных показателей в уравнениях

Обозначение	Смысловое значение	Т– статистика
S ₁	Запас воды в снеге на 20 марта, Чуня	5.3;
S ₂	Максимальный запас воды в снеге, Чуня	6.1
h ₁	h ₁ - Максимальная толщина льда р. Енисей – с. Ворогово	4.0
C ₁	C ₁ = h ₁ /L ₁ – комплексный показатель прочности льда и суровости зимы, где h ₁ - Максимальная толщина льда р. Енисей – с. Ворогово; L ₁ - Максимальное за зиму приближение кромки ледостава к г. Красноярску	5.2
ΔQ ₁	ΔQ ₁ = 0.56*(Q _{XII} – Q _{XI}) + 0.44*(Q _I – Q _{XII}), где (Q _{XII} – Q _{XI}) - разность среднемесячных расходов воды р. Енисей – г. Енисейск за декабрь и ноябрь (Q _I – Q _{XII}) – разность среднемесячных расходов воды р. Енисей – г. Енисейск за январь и декабрь	-3.2; -4.2
Q ₂	Среднемесячные сбросы воды Усть-Илимской ГЭС за март	5.2 5.5
ΔΔH ₂	ΔΔH ₂ = (ΔH ₅ – ΔH ₃), где ΔH ₃ = (H ₇ – H ₈) – превышение максимального зимнего уровня воды над предледоставным р. Енисей – с. Назимово; H ₇ – Максимальный зимний уровень воды р. Енисей – с. Назимово; H ₈ – Уровень воды в момент наступления ледовых образований р. Енисей – с. Назимово; ΔH ₅ = (H ₉ – H ₁₀) – превышение максимального зимнего уровня воды над предледоставным р. Енисей – г. Енисейск; H ₂ – максимальный зимний уровень воды р. Енисей – г. Енисейск; H ₅ – Уровень воды в момент наступления ледовых образований р. Енисей – г. Енисейск	-2.5 -2.6

Прогноз следует уточнить по уравнению 5.6 и 5.6-а в случае, когда в апреле выпадает большое количество осадков, больше **50** мм (Стрелка на Ангаре) - 1978, 1983, 1992, 1998, 2005, используя **максимальный** снегозапас воды в снеге – S₂, который может наступить как в марте, так и в апреле.

Если апрель холодный, то апрельские осадки увеличат снегозапас (максимальный снегозапас установится в апреле), а последующее тепло приведет к интенсивному снеготаянию и увеличит максимальный уровень воды. Если же апрель будет теплым, то, несмотря на выпадающие осадки, снегозапас в апреле может не увеличиться (слой таяния окажется больше слоя осадков). В этом случае максимальное снегонакопление наступит в марте. Из-за раннего наступления тепла снеготаяние окажется продолжительным и менее интенсивным, и, несмотря на выпавшие в апреле осадки, максимальный уровень воды не увеличится.

В табл. 5.4 приведены результаты авторских испытаний в 2005-2006 гг. и оперативных прогнозов по данным независимых наблюдений в Отделе Гидрологических Прогнозов КЦГМС-Р в 2007 г.

Таблица 5.4

Результаты долгосрочных прогнозов максимальных уровней воды на р. Енисей – с. Назимово в 2005-2007 гг.
(допустимая ошибка прогноза: 132 см)

Год	Н _{мах} Наблюдоу денный	Н _{мах} , рассчитанный по уравнению (1) / ошибка прогноза	Н _{мах} , рассчитанный по уравнению (1а) / ошибка прогноза	Н _{мах} , рассчитанный по уравнению (2) / ошибка прогноза	Н _{мах} , рассчитанный по уравнению (2а) / ошибка прогноза
2005*	753	595/ 158	574/ 179	659/ 94	640/ 113
2006	594	623 / -29	654 / -60	623 / -29	654 / -60
2007	823	953 / -130	888 / -65	953 / -130	888 / -65

2005* - в апреле выпало 56 мм осадков (Стрелка на Ангаре) – необходимые условия для уточнения прогноза, $S_1 = 92$ мм, $S_2 = 105$ мм, $H_{нмах}$ – наступил 3 мая.

Уравнения для прогноза максимального уровня воды р. Енисей - с. Ярцево ($H_{ямах}$)

Село Ярцево находится на 280 км ниже г. Енисейска, 102 км ниже с. Назимово. Рассматриваемый участок реки является одним из самых затороопасных на Енисее. За период с 1974 по 2006 гг в 50% случаев максимальный уровень здесь наблюдался при заторе льда, но в отдельные годы он отмечался на много позже начала ледохода, на 20-21 день (1989, 2002). Средняя дата наступления $H_{ямах}$ – 13 мая; крайние - 25 апреля (1997), 29 мая (2006).

Уравнения для прогноза максимального уровня воды в конце третьей декады марта:

Уравнение 5.7:

$$H_{ямах} = 4.090 * S_2 + 6.520 * h_1 + 2.775 * H_1 + 16.443 * \Delta T_3 - 634.406 ,$$

показатели точности: $R = 0.891$, критерий качества прогноза $S/\sigma = 0.486$;

Уравнения для прогноза максимального уровня воды в конце третьей декады апреля:

Уравнение 5.8:

$$H_{ямах} = 4.637 * S_2 + 4.207 * h_1 + 2.713 * H_1 + 13.222 * \Delta T_3 + 0.877 * H_4 - 531.396 ,$$

показатели точности: $R = 0.923$, критерий качества прогноза $S/\sigma = 0.422$;

Таблица 5.5

Описание переменных и обобщенных показателей в уравнениях

Обозначение	Смысловое значение	Г– статистика уравнение 1; 2
S ₂	Максимальный запас воды в снеге, Чуня	5.7; 7.1
h ₁	Максимальная толщина льда р. Енисей – с. Ворогово;	5.8; 3.4
H ₁	Уровень воды на момент начала ледовых образований р. Енисей – с. Ярцево (уровни воды принимаются в виде превышений над минимальными (150 см) в многолетнем ряду: $H_1 = (H - 150)$)	4.7; 5.2
ΔT ₃	Период установления ледостава на участке Ярцево - Ворогово, показатель зашугованности русла; Ворогово расположено в 114 км ниже Ярцево	5.3; 4.5
H ₄	Изменение уровня воды р. Енисей – с. Ярцево за третью декаду апреля: $H_4 = (H_{30.IV} - H_{20.IV})$, при наличии ледостава - комплексный показатель тенденции процессов, происходящих в бассейне и русле перед вскрытием	3.1

В табл. 5.6 приведены результаты оперативных прогнозов по данным независимых наблюдений

Таблица 5.6

Результаты долгосрочных прогнозов максимальных уровней воды на р. Енисей – с. Ярцево в 2005-2007 г г.

(допустимая ошибка прогноза: 135 см)

Год	H _{мах} Наблюденный	H _{мах} , рассчитанный по уравнению (1) / ошибка прогноза	H _{мах} , рассчитанный по уравнению (2) / ошибка прогноза
2005	1103	1079/ 24	1165/ -62
2006	840	910 / -70	849 / -9
2007	1401	1348 / 53	1478 / -77

Решением Технического совета от 25 октября 2007 г (протокол № 4) метод долгосрочного прогноза максимальных уровней воды р. Енисей в пунктах Назимово и Ярцево внедрен в качестве основного расчетного метода в отделе гидрологических прогнозов Среднесибирского УГМС.

Заключение

Настоящий отчет посвящен совершенствованию методической базы речных гидрологических прогнозов для территории Сибири на основе применения математических моделей формирования стока, использования спутниковой информации о динамике снегового покрытия территории и стандартной оперативной и прогностической информации Росгидромета. Основные результаты и выводы сводятся к следующему.

1. Зависимости запасов воды в снеге от высоты в бассейнах исследуемых водохранилищ отражают осредненные по экспозициям и другим местным особенностям района (подрайона) запасы воды в снеге на соответствующих высотах. Увеличение запаса воды в снежном покрове в горах наблюдается до определенной высоты, после которой снегозапас начинает уменьшаться, под влиянием ветрового переноса снега. Влияние метелевого переноса ярче всего проявляется в верхних зонах хребтов, выходящих за границу леса. В горах Западного Саяна, в лесном поясе, высота снежного покрова достигает 140-250 см. Выше границы леса она уменьшается.
2. Полностью реализована автоматическая система обработки и представления данных о площадях заснеженности речных бассейнов. Система состоит из двух программ: «Службы мониторинга снежного покрова» и «Информационного сайта службы мониторинга снежного покрова». В совокупности они обеспечивают автоматическую обработку данных о заснеженности ряда речных бассейнов на основе информации радиометра *MODIS* с КА *Terra* с суточной периодичностью, а также предоставляют доступ к полученной информации потребителям в любой точке земного шара и в любой момент времени посредством сети Интернет. Предоставляемая информация состоит из картосхем снежного покрова и облачности, табличной информации об относительных площадях заснеженности высотных зон районов бассейнов, и высоте границы снежного покрова в районах и бассейнах.
3. В составе системы мониторинга снежного покрова реализован алгоритм автоматического вычисления средней по району (бассейну) высоты границы снежного покрова. Для результатов классификации снега и маскирования витковых данных и суточных композитов рассчитывается средняя высота границы снега, среднеквадратичное отклонение высоты границы снега, объём выборки, а также количество пикселей границы снега, не учтенных при расчёте средней высоты как ненадёжные из-за соседства с облачностью или пропуском в данных. Рассчитываемые величины приводятся в табличной форме для всех районов и бассейна в целом. Испытание алгоритма по данным 2004—2007 гг. показало, что среднее квадратичное отклонение выборок высот снеговых границ по районам составляет 300—400 м. Это обес-

печивает среднюю точность оценки выборочной средней высоты лучше 10 м. Однако, сильная чувствительность результатов к конкретному распределению облачности в бассейне, в частности, к соотношению долей закрытия северных и южных склонов, не даёт использовать данные о высоте кромки снега на регулярной основе. Использовать можно только данные за чистые от облачности дни.

4. Анализ результатов маскирования облачности и классификации снега за период с октября 2004 по июнь 2007 показал, что 16-суточные композиты хорошо отражают динамику изменения площадей заснеженности круглый год, а не только в весеннее время. Не смотря на композицию данных разной давности, в среднем, 35% данных на композите представлено последними сутками, 50% — двумя последними сутками, 95% — десятью последними сутками, а 99% — четырнадцатью сутками. Поэтому дальнейшее увеличение периода композиции свыше 16 суток является нецелесообразным. Подчеркнем, что в среднем 85 % данных на композите представлено последними двумя сутками, что говорит о возможности применения в гидрологических прогнозах 16-суточных композитов для анализа динамики изменения площадей заснеженности.
5. Оптимизация параметров моделей прогноза притока воды в водохранилища в новом варианте обеспечивает лучшее соответствие оценок водно-балансовых характеристик данным наблюдений, за счет существенного увеличения объема наземной и «спутниковой» (Terra) информации.
6. Реализована на практике методика поэтапной оптимизации параметров модели. Первый этап оптимизации обеспечил равенство «модельных» и полученных независимым расчетом норм снегонакопления по районам и высотным зонам. В результате второго этапа оптимизации согласованы «модельные» и «фактические» значения слоя стока по районам бассейнов исследуемых. Третий этап оптимизации параметров руслового и склонового добега позволил улучшить совпадение фактических и рассчитанных гидрографов ежедневного притока воды в водохранилища. В ходе четвертого этапа оптимизации использованы результаты космического мониторинга динамики заснеженности бассейна за 2004, 2005, 2006 и 2007 гг, в результате которой временной ход «модельной» площади снегового покрытия приведен в соответствие изменению «космической». После пятого этапа оптимизации соответствие рассчитанных по модели и реальных характеристик высотного распределения снеготоплив и районных величин слоя стока следует считать более обоснованным за счет учета спутниковой информации.

7. На заключительном этапе оптимизации определяются коэффициенты C_i , y_1 и y_2 комбинированной модели, учитывающей уровни (расходы) воды в русловой системе. Выполнены численные эксперименты, в результате которых даны оценки точности и устойчивости коэффициентов C_i при их определении по методам линейной регрессии и оптимизации.
8. На основе физико-статистического подхода разработан метод прогноза максимальных уровней воды на участках рек Томь- г. Томск, Енисей – с. Назимово и Енисей - с. Ярцево.
9. Авторские испытания, а также оперативные испытания в 2007 г ряда методов, предложенных для Енисейского бассейна (Среднесибирское УГМС), показали хорошую точность прогнозов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

(к главам 1,3,4,5, Заключение; к главе 2 см. конец главы 2)

К главам 1, 3, 4

1. Бураков Д.А. Предвычисление гидрографа весеннего половодья заболоченных рек в южной части лесной зоны Западно-Сибирской низменности.– Метеорология и гидрология, 1966, № 1, с.42–46.
2. Бураков Д.А. К оценке параметров уравнений, аппроксимирующих кривую руслового добегания.– Водные ресурсы, 1978, №4, с.21–24.
3. Бураков Д.А. Кривые добегания и расчет гидрографа весеннего половодья. –Томск: Томский госуниверситет, 1978.– 129 с.
4. Бураков Д.А. Математическая модель расчета гидрографа весеннего половодья для равнинных заболоченных бассейнов.– Метеорология и гидрология, 1978, № 1, с.49–59.
5. 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.
6. 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», том 1, Красноярск, 2003, с. 14–21.
7. Бураков Д.А., Галахов В.П., Нарожный Ю.К. и др. Снежно-водно-ледниковые ресурсы Верхней Оби и прогнозы стока весеннего половодья. –Томск: Томский госуниверситет, 1986. – 254 с.

8. Бураков Д.А., Кашкин В. Б., Сухинин А. И., Ромасько В. Ю., Ратненко И.В. Методика определения заснеженности речного бассейна по спутниковым данным для оперативных прогнозов стока.– Метеорология и гидрология, 1996, № 8, с.100–109.
9. Бураков Д.А., Мельникова О.В. Аппроксимация кривых добегаания при отрицательной асимметрии с использованием зеркального преобразования гамма-распределения.// Метеорология и гидрология.-2000–№4.–С.75-87.
10. Виноградов Ю.Б. Математическое моделирование процессов формирования стока. Гидрометеиздат, Л.: 1988.– 312 с.
11. Калюжный И.Л., Павлова К.К. Формирование потерь талого стока. Гидрометеиздат, Л.: 1981. –160 с.
12. Комаров В.Д., Макарова Т.Т., Синегуб Е.С. Расчёт гидрографа половодья небольших равнинных рек на основе данных об интенсивности снеготаяния // Труды ГМЦ.- 1964, вып. 3.- с. 3-30.
13. Корень В.И. Математические модели гидрологических прогнозов. Гидрометеиздат, Л.: 1991.– 199 с.
14. Котляков В.М., Ходаков В.Г., Гринберг А.М. Тепловое проявление снежно-ледовых объектов как метод количественной интерпретации аэрокосмической информации // Изв. АН СССР. Сер. Геогр. - 1981. - №3. - с.127-134.
15. Кучмент Л.С. Математическое моделирование речного стока. Гидрометеиздат, Л.: 1974.– 191 с.
16. Кучмент Л.С., Гельфан А.Н. Динамико-стохастические модели формирования речного стока, М., Наука, 1993.-С.108.
17. Мухин В.М. Модели формирования стока горной реки// Тр. ГМЦ, вып. 186, 1977
18. Нарожный Ю.К. Распределение снегозапасов на ледниках Центрального Алтая // Материалы гляциологических исследований, вып. 73, 1992, с. 125-131.
19. Попов Е. Г. Вопросы теории и практики прогнозов речного стока. Гидрометеиздат, М.: 1963.– 256 с.
20. Ревякин В.С., Барахтин В.Н., Виноградов В.А., Кошинский С.Д., Попов В.И., Тырышканов В.П., Чубенко А.Г. Снежный покров Горного Алтая // Материалы гляциологических исследований. - 1974. - № 23.- С.160 - 168.
21. Ревякин В.С., Галахов В.П., Голещихин В.П. Горноледниковые бассейны Алтая. - Томск: Изд-во ТГУ, 1979.- 310 с.
22. Ревякин В.С., Кравцова В.И. Снежный покров и лавины Алтая. -Томск: Изд-во ТГУ, 1977.- 216 с.

23. Ревякин В.С., Попов В.И. Полюс снежности Алтая // Известия ВГО. –1976. – Т. 108. - Вып. 6. – С. 550-554.
24. Ревякин В.С., Чубенко А.Г., Виноградов В.А. Запасы снеговой влаги в горном Алтае // Сборник / Водные ресурсы Алтайского края и их комплексное использование. – Барнаул, 1971. – С. 30-34.
25. Харшан А.А. Долгосрочные прогнозы стока половодья горных рек Сибири. // Труды ГМЦ.- 1975.– вып. 65. – 128 с.
26. Харшан А.А. Долгосрочные прогнозы стока половодья горных рек Сибири. – Москва: ГИМИЗ, 1958. – 182 с
27. Ходаков В.Г. Водно-ледовый баланс районов современного и древнего оледенения СССР. - М.: Наука,1978.-194 с.
28. ГМЦ России, тема 1.1.1.2, плана НИР и ОКР Росгидромета. Руководитель С.В. Борщ. «Усовершенствовать алгоритмы модели формирования весеннего стока, определения заснеженности на основе ИСЗ». Раздел темы 1.1.1.4. Руководитель раздела д.г.н. Д.А. Бураков. Авторы: Д.А. Бураков, В.Ю. Ромасько, В.Ф. Космакова и др. Красноярск – Москва (промежуточные отчеты по НИР за 2005, 2006 гг).
29. Тема 1.9.4.7 плана НИР Росгидромета за 1999 г. Отчет по НИР: «Разработать метод краткосрочного прогноза ежедневных и максимальных уровней (расходов) воды рек бассейна Оби, притока воды в Новосибирское водохранилище в период весеннего половодья на основе спутниковой и наземной информации». Красноярский НИЦ, 1999.

Литература к главе 2

1. Бураков Д.А., Кашкин В. Б., Сухинин А. И., Ромасько В. Ю., Ратненко И.В. Методика определения заснеженности речного бассейна по спутниковым данным для оперативных прогнозов стока.– Метеорология и гидрология, 1996, № 8, с.100–109..
2. Ackerman, S., K. Strabala, P. Menzelli, R. Frey, C. Moeller, L. Gumley, B. Baum, C. Schaaf, G. Riggs, 1997: Discriminating clear-sky from cloud with MODIS algorithm theoretical basis document.
3. Ben-Dor, E., 1994: A precaution regarding cirrus cloud detection from airborne imaging spectrometer data using the 1.38 mm water vapor band. Remote Sens. Environ., 50, 346-350.
4. Chang, A.T.C., J.L. Foster and D.K. Hall, 1987: Microwave snow signatures (1.5 mm to 3 cm) over Alaska, Cold Regions Science and Technology, 13, pp 153-160.

5. Carroll, T.R., 1990: Operational airborne and satellite snow cover products of the National Operational Hydrologic Remote Sensing Center, Proceedings of the forty-seventh annual Eastern Snow Conference, June 7-8, 1990, Bangor, Maine, CRREL Special Report 90-44.
6. Dozier, J., 1989: Spectral signature of alpine snow cover from the Landsat Thematic Mapper, *Remote Sensing of Environment* 28, pp 9-22.
7. Foster, J.L., D.K. Hall, A.T.C. Chang and A. Rango, 1984: An overview of passive microwave snow research and results, *Reviews of Geophysics*, 22, pp 195-208.
8. Hall, D.K., G. A. Riggs, V. V. Salomonson, 2001: Algorithm Theoretical Basis Document for the MODIS Snow and Sea Ice-Mapping Algorithms.
9. Hall, D.K., G.A. Riggs and V.V. Salomonson, 1995: Development of methods for mapping global snow cover using moderate resolution imaging spectroradiometer data, *Remote Sensing of Environment*, 54, pp 127-140.
10. Hall, D.K., J.L. Foster, D.L. Verbyla, A.G. Klein and C.S. Benson, 1998: Assessment of snow-cover mapping accuracy in a variety of vegetation-cover densities in central Alaska, *Remote Sensing of Environment*, 66:129-137.
11. Hall, D.K., J.L. Foster, V.V. Salomonson, A.G. Klein and J.Y.L. Chein, 2001: Development of a technique to assess snow-cover mapping errors from space, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(2):432-438.
12. Hall D.K., R.E.J. Kelly, G.A. Riggs, A.T.C. Chang and J.L. Foster, in press: Assessment of the relative accuracy of hemispheric-scale snow-cover maps, *Annals of Glaciology*, 34.
13. Matson, M., C.F. Ropelewski and M.S. Varnadore, 1986: An atlas of satellitederived northern hemisphere snow cover frequency, National Weather Service, Washington, D.C., 75 pp.
14. Klein, A.G., D.K. Hall and G.A. Riggs, 1998: Improving snow cover mapping in forests through the use of a canopy reflectance model, *Hydrological Processes*, 12:1723-1744 .
15. Matson, M., 1991: NOAA satellite snow cover data, *Palaeogeography and Palaeoecology*, 90, pp 213-218.
16. Ramsay, B., 1998: The interactive multisensor snow and ice mapping system, *Hydrological Processes*, 12:1537-1546.
17. Rango, A., 1993: Snow hydrology processes and remote sensing, *Hydrological Processes*, 7:121-138.
18. Rango, A. and J. Martinec, 1982: Snow accumulation derived from modified depletion curves of snow coverage, *Symposium on Hydrological Aspects of Alpine and High Mountain Areas*, IAHS Publication No. 138:83-90.

18. Robinson, D.A., K.F. Dewey and R.R. Heim Jr., 1993: Global snow cover monitoring: an update. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 74:1689-1696.
19. Singer, F.S. and R.W. Popham, 1963: Non-meteorological observations from weather satellites, *Astronautics and Aerospace Engineering*, 1(3), pp 89-92.
20. Tucker, C.J., 1979: Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation, *Remote Sensing of Environment*, 8, pp 127-150.
21. Tucker, C.J., 1986: Maximum normalized difference vegetation index images for sub-Saharan Africa for 1983-1985, *International Journal of Remote Sensing*, 7, pp 1383-1388
22. ГМЦ России, тема 1.1.1.2, плана НИР и ОКР Росгидромета. Руководитель С.В. Борщ. Промежуточный отчет по НИР: «Усовершенствовать алгоритмы модели формирования весеннего стока, определения заснеженности на основе ИСЗ». Раздел темы 1.1.1.2. Руководитель раздела д.г.н. Д.А. Бураков. Авторы: Д.А. Бураков, В.Ю. Ромасько, В.Ф. Космакова и др. Красноярск – Москва, 2005.
23. ГМЦ России, тема 1.1.1.2, плана НИР и ОКР Росгидромета. Руководитель С.В. Борщ. Промежуточный отчет по НИР: «Усовершенствовать алгоритмы модели формирования весеннего стока, определения заснеженности на основе ИСЗ». Раздел темы 1.1.1.2. Руководитель раздела д.г.н. Д.А. Бураков. Авторы: Д.А. Бураков, В.Ю. Ромасько, В.Ф. Космакова и др. Красноярск – Москва, 2006.
24. Riggs G., Hall D., Salomonson V. MODIS Snow Products User Guide to Collection 5. November 2006.

Литература к главе 5

1. Бузин В.А. Методы прогнозов зажерных и заторных явлений.– Труды пятого всесоюзного гидрологического съезда, 1989, том 7.–Л: Гидрометеиздат.
2. Донченко Р.В. Исследования, расчеты и прогнозы зажеров и заторов.– Труды V Всесоюзного гидрологического съезда, 1989, том 7.–Л: Гидрометеиздат.
3. Лиссер И.Я. О зависимостях для прогноза максимальных заторных (ледоходных) уровней воды при вскрытии сибирских рек.– *Метеорология и гидрология*, 1981, №11, с.83-87.
4. Шуляковский Л.Г., Еремина В.А. К методике прогноза заторных уровней воды.– *Метеорология и гидрология*, 1952, №1, с.46-51.
5. ГМЦ России, тема 1.1.1.2, плана НИР и ОКР Росгидромета. Руководитель С.В. Борщ. «Усовершенствовать алгоритмы модели формирования весеннего стока, определения заснеженности на основе ИСЗ». Раздел темы 1.1.1.4. Руководитель раздела д.г.н. Д.А. Бураков. Авторы: Д.А. Бураков, В.Ю. Ромасько, В.Ф. Косма-

кова и др. Красноярск – Москва (промежуточные отчеты по НИР за 2005, 2006 гг).