

Современные методы гидрологических прогнозов (на примере рек Сибири)

Бураков Дмитрий Анатольевич,
д.г.н.

Красноярский государственный Аграрный университет / СибНИГМИ
daburakov@yandex.ru



Научно-практическая школа-семинар молодых ученых и специалистов в области гидрометеорологии
31 октября – 2 ноября 2012 года
г. Новосибирск

Наводнение в Красноярске



$$\frac{\sigma_{\delta}}{\sigma}$$





7 июля 2012 г, г. Крымск, число погибших исчисляется сотнями человек. Только в один из моргов Крымска поступило около 400 тел погибших.



Карта бассейна р.Адагум

Наводнение в Крымске 6 июля 2012: глазами очевидцев

В ночь на 7 июля Крымск в Краснодарском районе была накрыло волной. По рассказам очевидцев, волна достигала в некоторых местах высоты 7 м.

Юлия Андропова пишет: «Крымск смывает с лица земли. Самое страшное, что это произошло ночью, люди во сне затонули целыми семьями, не просыпаясь. В 3 часа утра я выходила на улицу, воды ещё не было, но в 3:30 все было уже затоплено. Это странно видеть, как первые этажи квартир (которые на достаточно высоком фундаменте) полостью ушли под воду. На стене винзавода отметка воды достигала более 7 м!!!.....».

Можно ли было выдать прогноз, предупредить население?

ЭКСПРЕСС ПРОГНОЗ

Использована информация:

Данные о количестве осадков - данные КРАСНОДАРСКОГО ЦГМС.

Данные о площадях водосборов - данные Водного кадастра. Данные

о предшествующей метеорологической обстановке, вызвавшей высокое предпаводочное увлажнение почвы приводят

ОЧЕВИДЦЫ, согласно которым «Неделю идут дожди - всё пропиталось водой, и ВСЯ НОВАЯ ВОДА стекает в реки и ручьи»

Привожу расчет

Площадь водосбора $F = 111 (\text{р. Неберджайка}) + 179 (\text{Баканка}) = 280 \text{ кв.км}$

Средний слой осадков (X) на водосборе в среднем **250 мм**

Продолжительность подъема эффективной части дождя плюс время добегания пика волны паводка примерно **$t_p = 5$ часов**

Рассчитаем максимальный расход воды $Q_{\max}$ паводка в центре г. Крымска (ниже слияния рек Неберджайки Баканки) по объемной формуле проф. Д.Л. Соколовского (Речной сток).

$$Q_{\max} = (0.28X \cdot \alpha f \cdot F \cdot f) / t_p,$$

коэффициент стока $\alpha f = 0,70$ (высокое предшествующее увлажнение)

коэффициент формы паводка $f = 2 / (1 + t_c / t_p) = 0.50$,

где $t_c / t_p = 3$ (отношение продолжительности спада t_c к продолжительности подъема паводка t_p)

$$Q_{\max} = 0,28 \cdot 250 \cdot 0,7 \cdot 290 \cdot 0,5 / 5 = \mathbf{1421} \text{ куб.м/сек.}$$

Определим площадь поперечного сечения разлившейся реки w :

$$w = Q_{\max} / v,$$

где v – средняя скорость течения в зоне затопления.

Скорость течения потока (В СРЕДНЕМ, С УЧЕТОМ СОПРОТИВЛЕНИЯ ГОРОДСКИХ ПОСТРОЕК, РАСТИТЕЛЬНОСТИ, И Т.Д.) примем $v = 0,50$ м/сек. (при этом максимальные скорости в струях и в русле могут быть в несколько раз выше).

Следовательно,

$$w = Q_{\max} / v = 1421 / 0,50 = \mathbf{2842 \text{ кв. метра.}}$$

Очевидно, площадь сечения равна

$$w = B * H,$$

где B - ширина разлившейся реки,

H - ИСКОМАЯ ГЛУБИНА (в метрах).

Примем ширину разлившейся реки примерно **B = 1500** метров.

Итак, глубина затопления в среднем равна

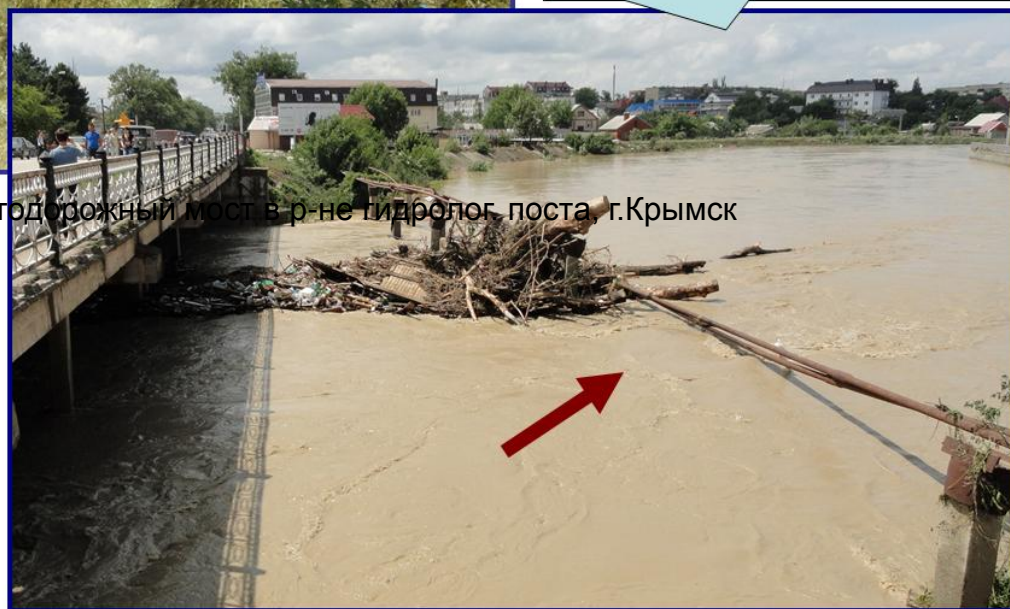
$$H = w / B = 2842 / 1500 = \mathbf{1,9 \text{ м.}}$$

В русле - возникают временные завалы, в струях появляются зоны подпора и гидравлические прыжки при переходах от критических глубин к нормальным (прыжки могут быть не затопленного, или затопленного типов).



верхний бьеф

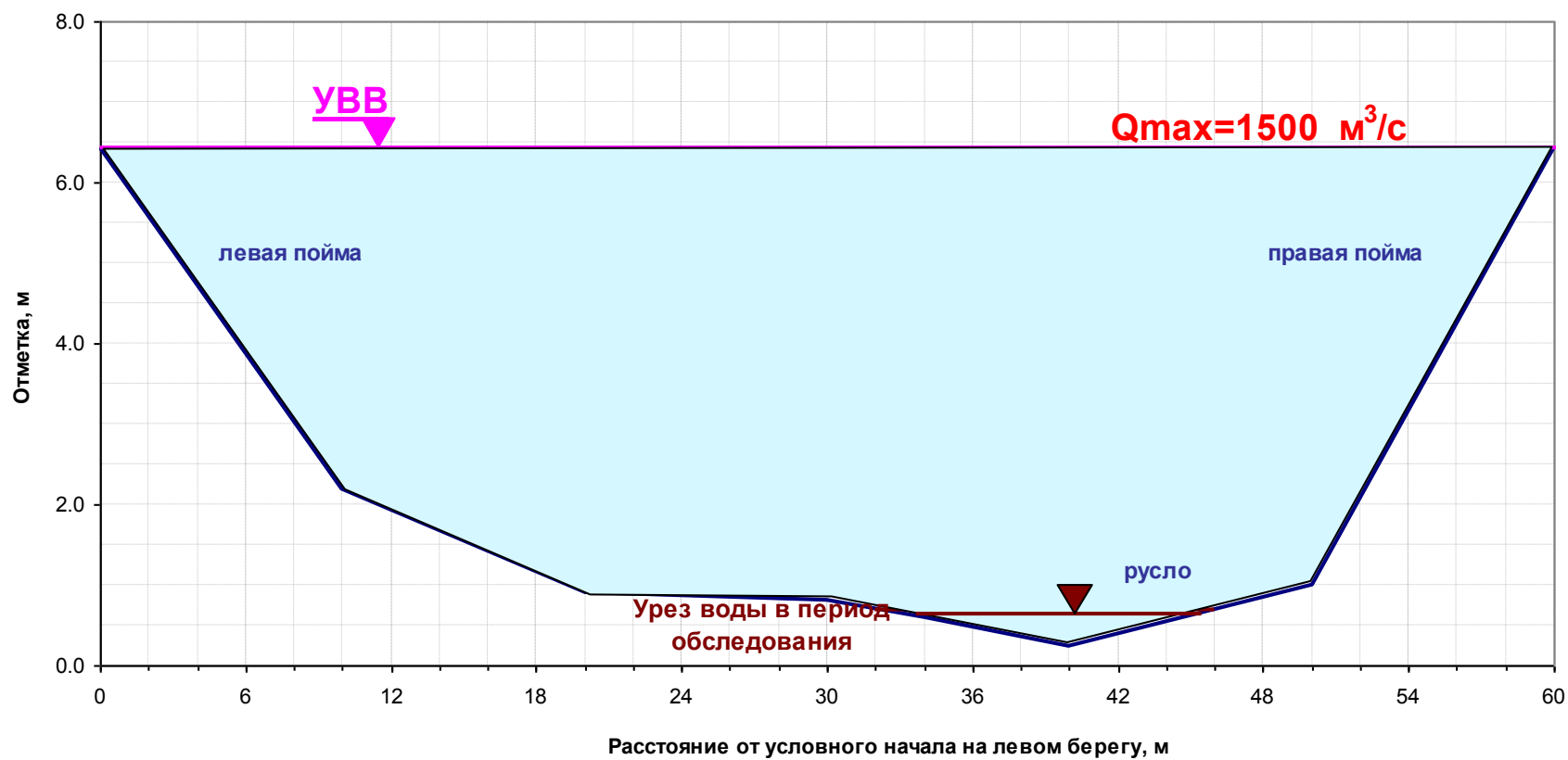
нижний бьеф



Автодорожный мост в р-не гидролог. поста, г.Крымск

Автодорожный мост в р-не гидролог. поста, г.Крымск

р.Адагум в 6,2 км выше Варнавинского водохранилища (створ № 19)



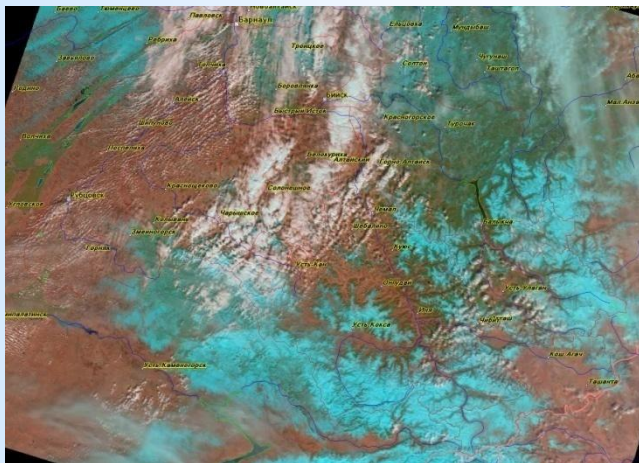
**Космическая информация в моделях прогноза стока
весеннего половодья и притока воды в водохранилища
Сибирских ГЭС**
(оценка площади снегового покрытия)



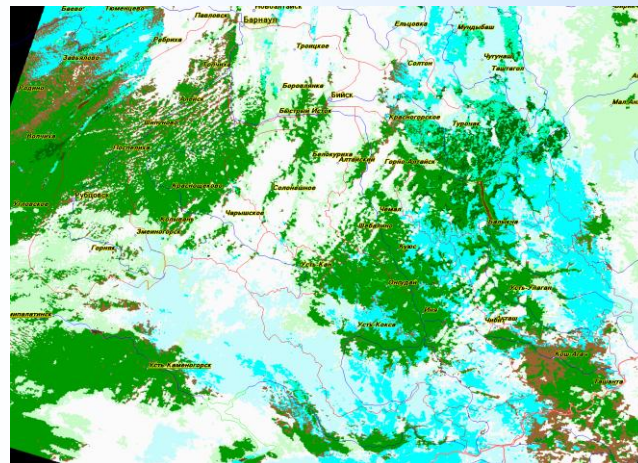
Для обработки спутниковых изображений, полученных
в видимом и инфракрасном диапазонах спектра,
создан АРМ (программа) «Snow»

Сервис службы мониторинга снега

ОБЗОРНЫЙ СНИМОК



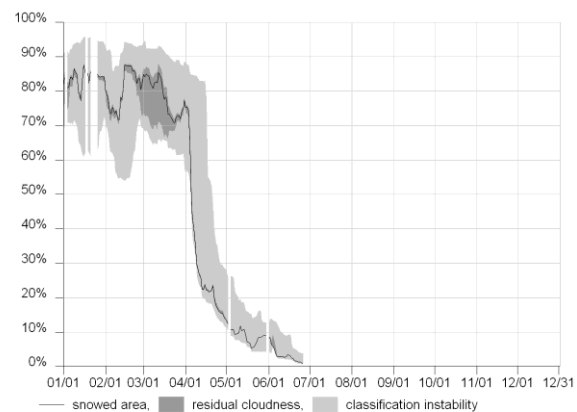
Классификация



Информация о площади покрытия снегом

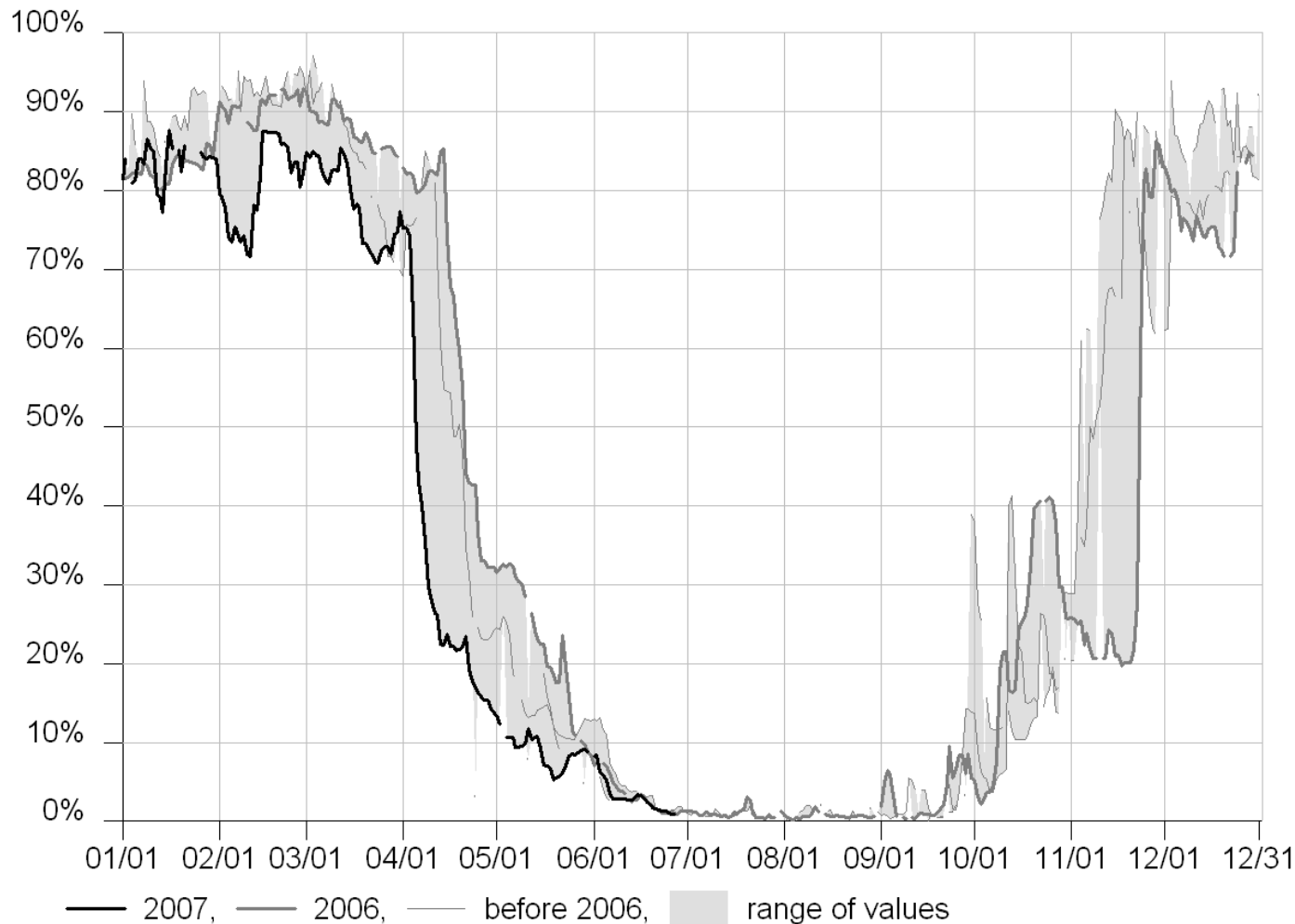
Район	Суточная заснеженность				
	Минимальная, %	Вероятная, %	Максимальная, %	Облачность, %	Нет данных, %
Бассейн	13.00	26.72	64.35	51.35	0.00
р-н. Алей	1.64	4.34	63.82	62.18	0.00
р-н. Чарьш-1	0.59	1.10	46.99	46.40	0.00
р-н. Чарьш-2	0.20	1.20	83.21	83.00	0.00
р-н. Кагунь-2	17.88	36.95	69.50	51.63	0.00
р-н. Кагунь-3	19.38	27.37	48.57	29.19	0.00
р-н. Песчаная	0.48	2.40	80.44	79.96	0.00
р-н. Кагунь-1	12.52	22.55	56.99	44.46	0.00
р-н. Бия-1	30.27	47.36	66.35	36.09	0.00
р-н. Бия-2	35.60	55.38	71.32	35.72	0.00

Графическая информация



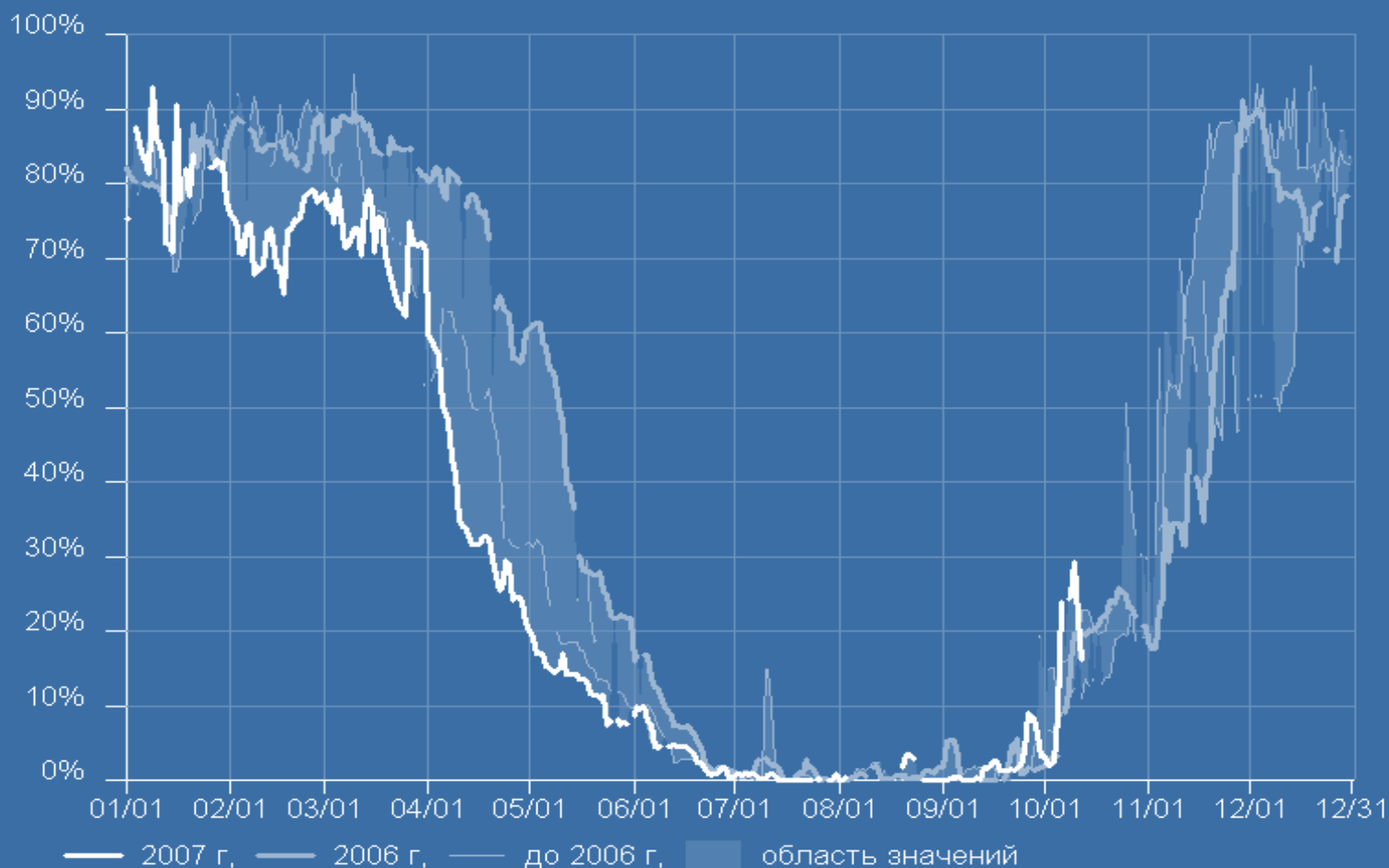
Совмещенные кривые изменения заснеженности в 2004-2007 годах (бассейн Новосибирского водохранилища)

<http://lpoki.akadem.ru/snow/snow-gate.exe?2alttg.html>



Совмещенные кривые изменения заснеженности в 2004-2007 годах в бассейне Красноярского водохранилища

<http://lpoki.akadem.ru/snow/snow-gate.exe?2alttg.html>

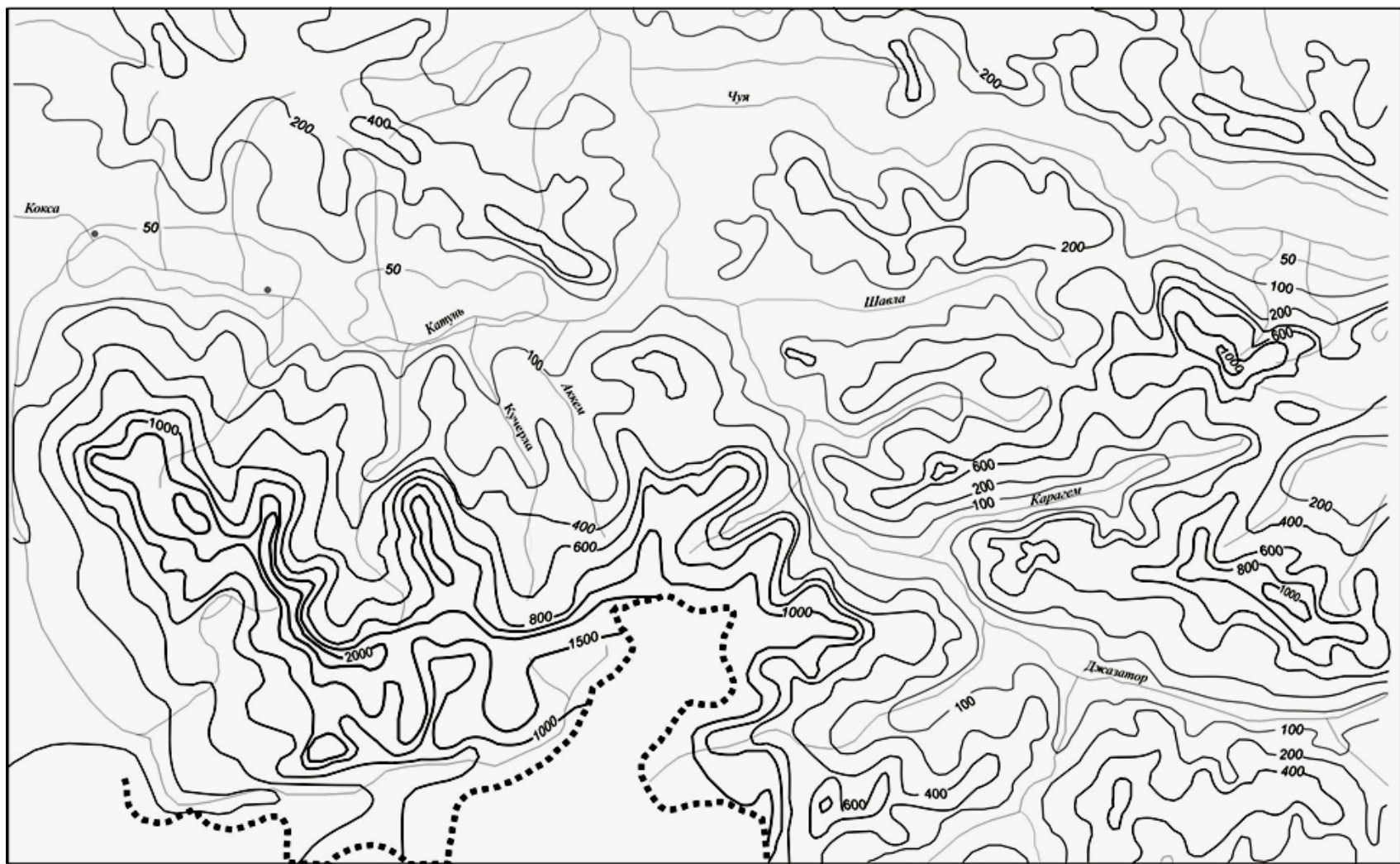


**Спутниковая информация, обработанная пакетом программ
«Служба мониторинга заснеженности» используется:**

**Для оптимизации параметров
блока снегонакопления и
снеготаяния гидролого-
математической модели**

**Для оценки снегонакопления и
картирования нормы запаса
воды в снеге в горах**

**Для текущей корректировки
прогноза притока воды в
водохранилища ГЭС и ежедневных
уровней (расходов воды)**



Фрагмент карты снегозапасов на 20 марта
с использованием спутниковой информации
(Центральный Алтай, Россия)

Д.Бураков, Н.Игловская, Ю.Нарожный

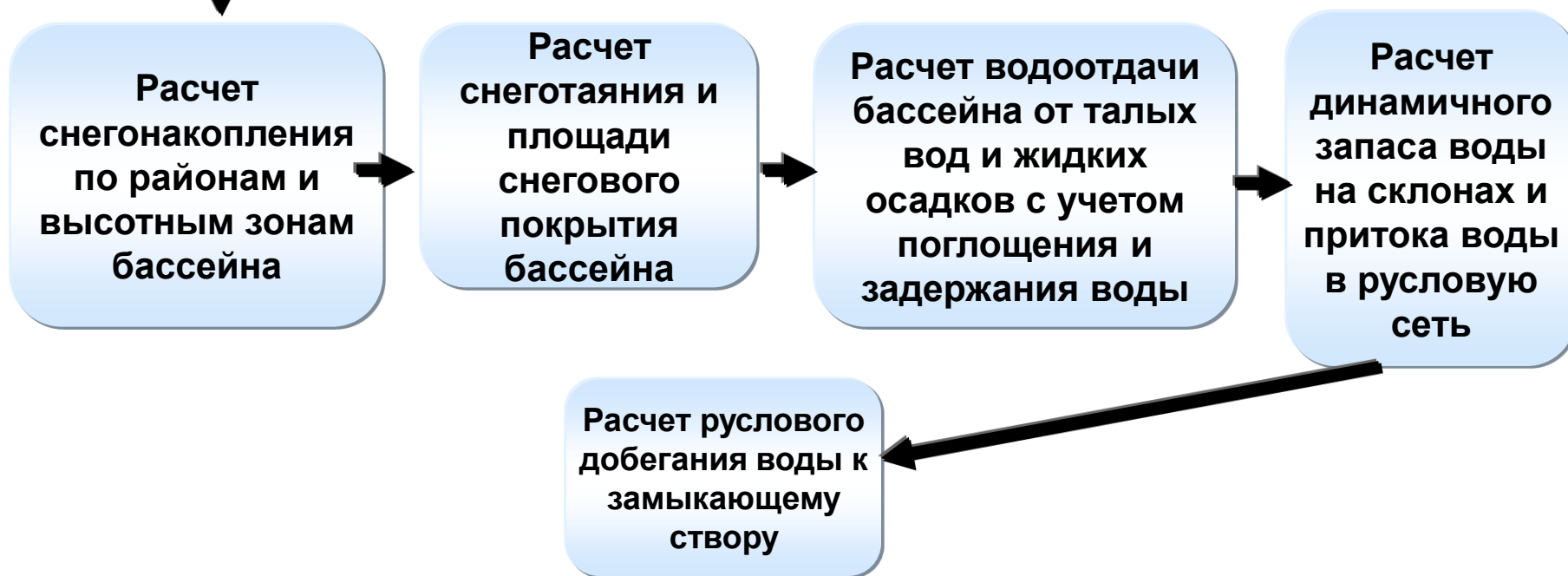


**Разработка и реализация системы
прогноза стока рек и притока воды в
водохранилища сибирских ГЭС**

Гидролого-математическая модель стока – основа прогноза

На практике получили развитие модели, оперирующие с некоторыми осредненными по территории укрупненными показателями («макрогенетический» подход по А.В. Огиевскому).

Структура гидролого-математической модели



Принципы построения модели :

В бассейне выделяются ландшафтно-гидрологические районы и высотные зоны

Пространственная неравномерность снегонакопления и емкостного поглощения учитываются с применением вероятностных распределений

Русловое добегание воды рассчитывается с применением функции плотности распределения вероятности времени добега элементарных объемов воды

***Разработана технологическая линия прогноза стока
весеннего половодья, ежедневных расходов (уровней) воды
и притока воды в водохранилища Сибирских ГЭС,
включающая***

**Программное обеспечение,
реализующее расчет (прогноз)
и оптимизацию параметров
модели стока весеннего
половодья и притока воды в
водохранилища Енисейских и
Обской ГЭС**

**Пакет программного
обеспечения «Snow»,
предназначенный для
обработки спутниковых
изображений, полученных в
видимом и инфракрасном
диапазонах спектра**

Программное обеспечение, реализующее модель, позволяет:

**Использовать
всю доступную
информацию
(метеорологическую,
гидрологическую)**

**Выдавать кратко- и
среднесрочные
прогнозы ежедневных
уровней и расходов
воды, притока воды в
водохранилища**

**Используя встроенную базу данных,
моделировать возможные
гидрометеорологические ситуации
выдавать месячные и квартальные
прогнозы с учетом сложившихся
начальных условий, и погоды по году-
аналогу**

Модель прогноза учитывает процессы формирования стока на склонах и в русловой сети:

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

где:

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

t – дата выпуска прогноза;

Δt – заблаговременность прогноза;

n – число ландшафтно-гидрологических районов;

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

$f_{q_i}(\tau)$ – кривая добегания бокового притока с i -ого района;

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

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

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

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

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

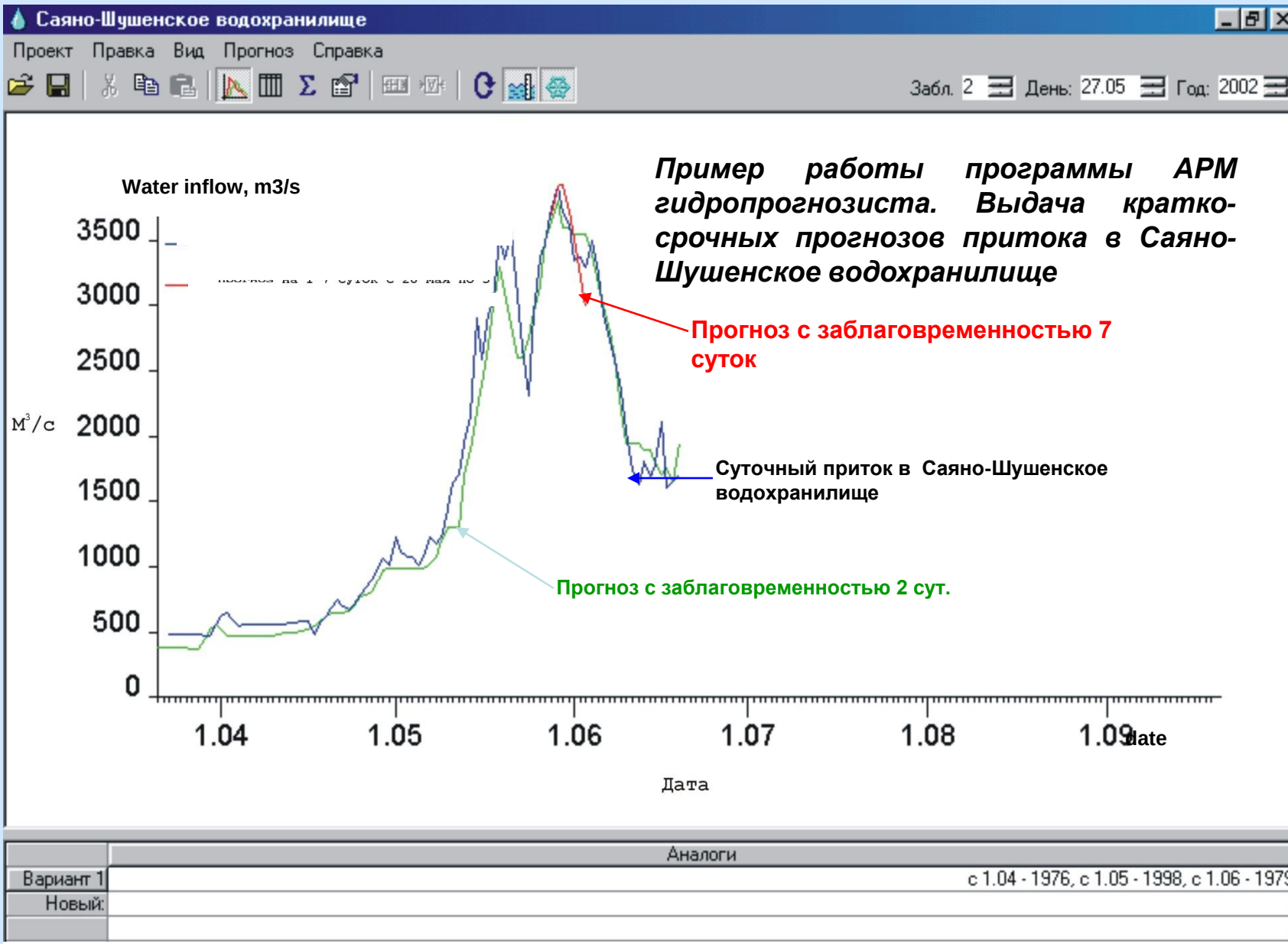
где t - время; $\varphi(t)$ - относительная действующая площадь, в пределах которой происходит пополнение динамического запаса воды (изменяется от нуля в состоянии высыхания бассейна, до $(1-\omega)$ при насыщении почвы водой); ω - доля постоянно бессточной площади в бассейне; h - слой подачи дождевой (талой) воды за расчётный интервал; Z - испарение; l - впитывание, связанное с пополнением базисного стока; 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. Параметр поглощения талых вод (максимальные потери) определяется по эмпирической зависимости от косвенных показателей предшествующего увлажнения бассейна.

$Q_w(t+\Delta t)$ – 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]:

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

где: $H(t+\Delta t)$ – прогнозируемый уровень воды в замыкающем створе; c_i , $y1$, $y2$ - 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.



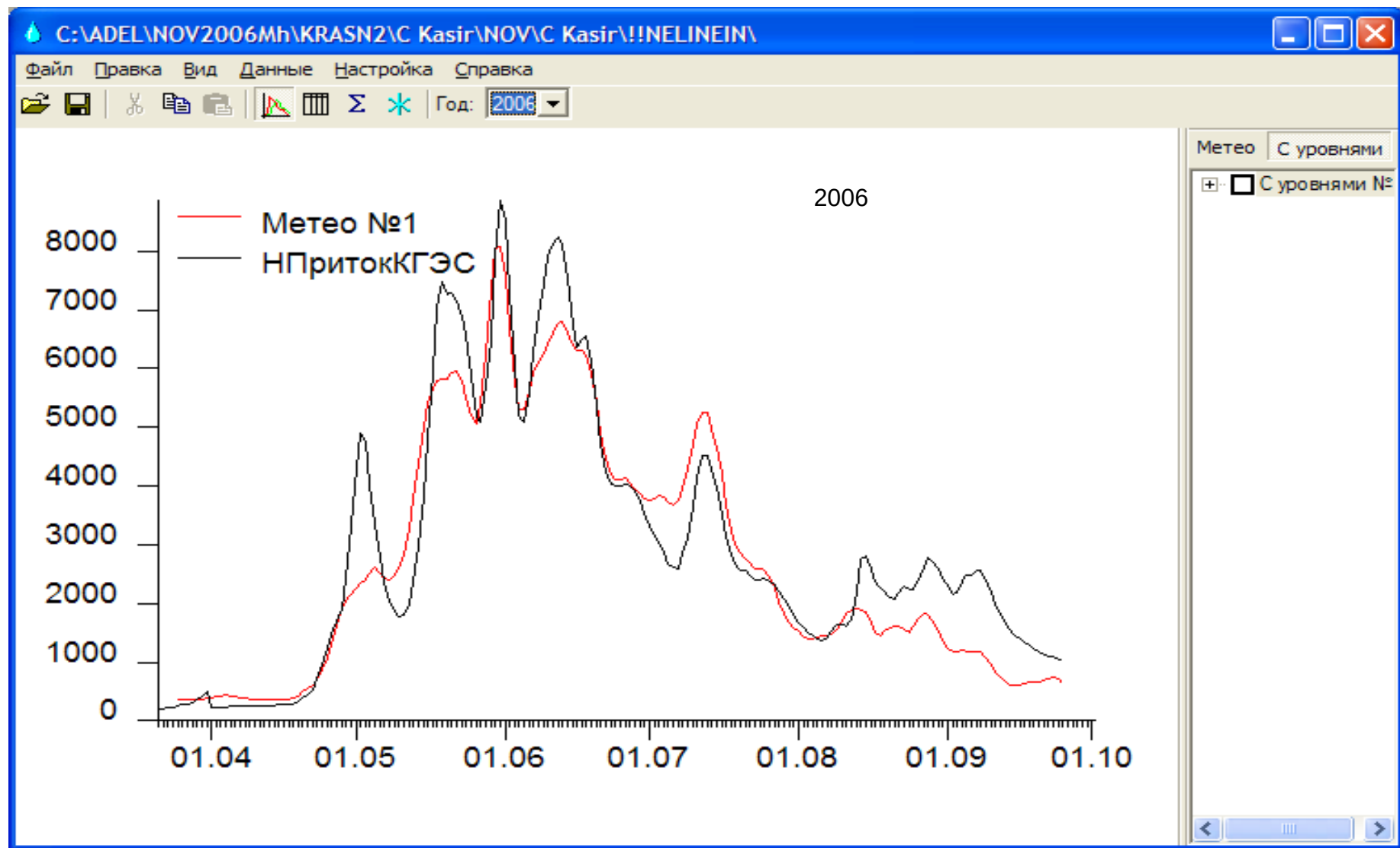
Показатели качества методики расчета ежедневного притока в водохранилище Обской ГЭС

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 заблаговременности	227	400	550	680	793	896	991
$\frac{\sigma_{\delta}}{\sigma}$	Критерий методики	0.77	0.67	0.57	0.50	0.44	0.42	0.40

Показатели качества методики расчета ежедневного притока в водохранилище Красноярской ГЭС

Δt	Заблаговременность прогноза, сутки	1	2	3	4	5	6	7
S	Средняя квадратичная ошибка расчета, м3/с	129	227	321	408	467	504	524
σ	Среднее квадратичное отклонение притока за период Δt , м3/с	279	525	784	904	1041	1149	1238
S / σ	Критерий методики, вариант <u>2007</u> 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 <u>2006</u> г, данные за 22 года, 2-3 квартал	0.52	0.45	0.45	0.46	0.45	0.44	0.42

Рассчитанный и фактический гидрограф притока воды в водохранилище Красноярской ГЭС по модели А – «снеготаяние-осадки-сток» (уровни воды на реках и приток на момент выпуска)



Долгосрочный прогноз притока в водохранилища сибирских ГЭС за второй квартал

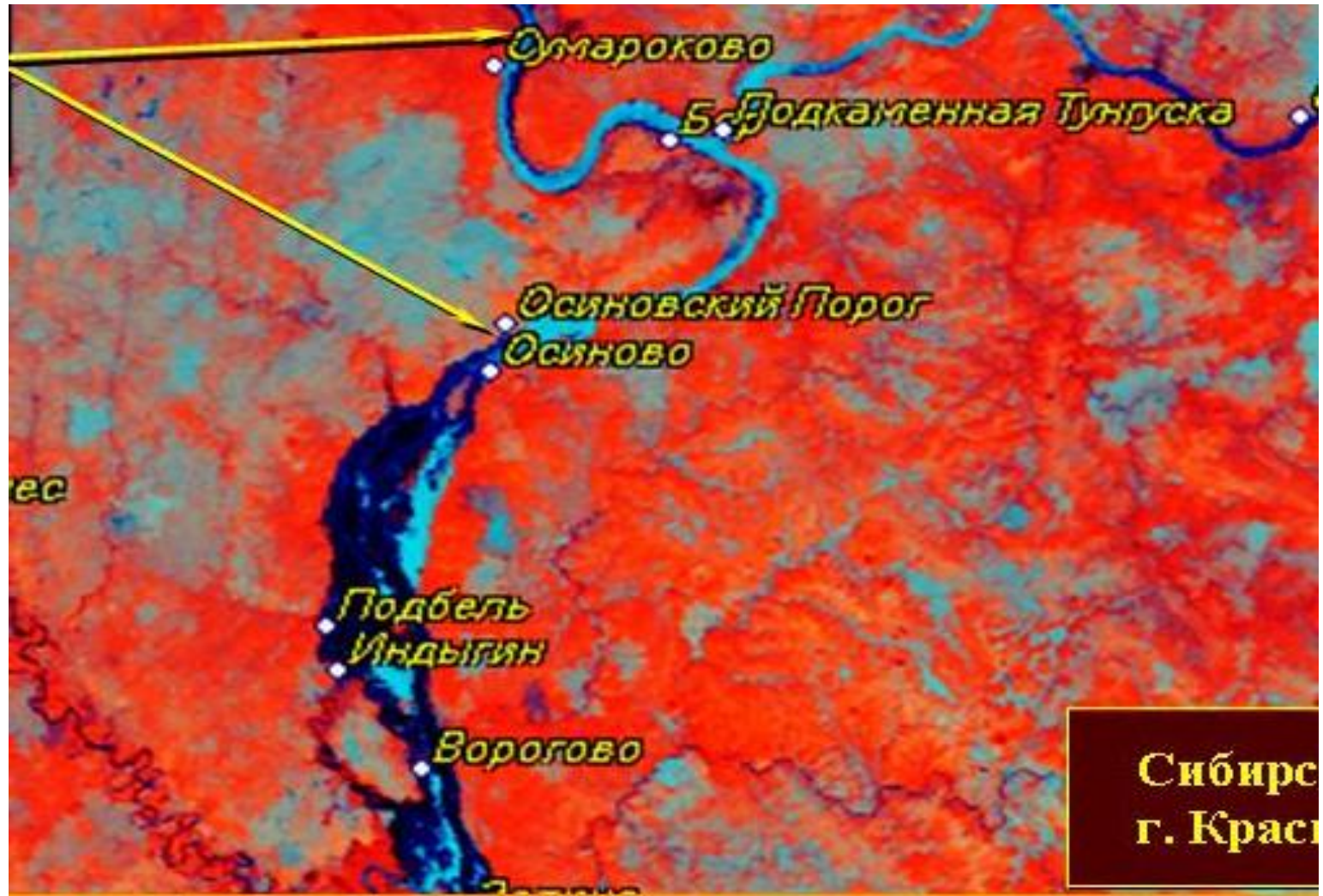
Долгосрочный прогноз притока за второй квартал может выполняться с применением модели А—«снеготаяние—осадки—сток», путем задания года-аналога, характеризующего ход осадков и температуры воздуха прогнозируемого периода, который подбирается по данным многолетних наблюдений на основе долгосрочного прогноза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

Оправдываемость декадных прогнозов за апрель-сентябрь в 2007 г составила для Красноярского водохранилища 78%, для Саяно-Шушенского 76%.

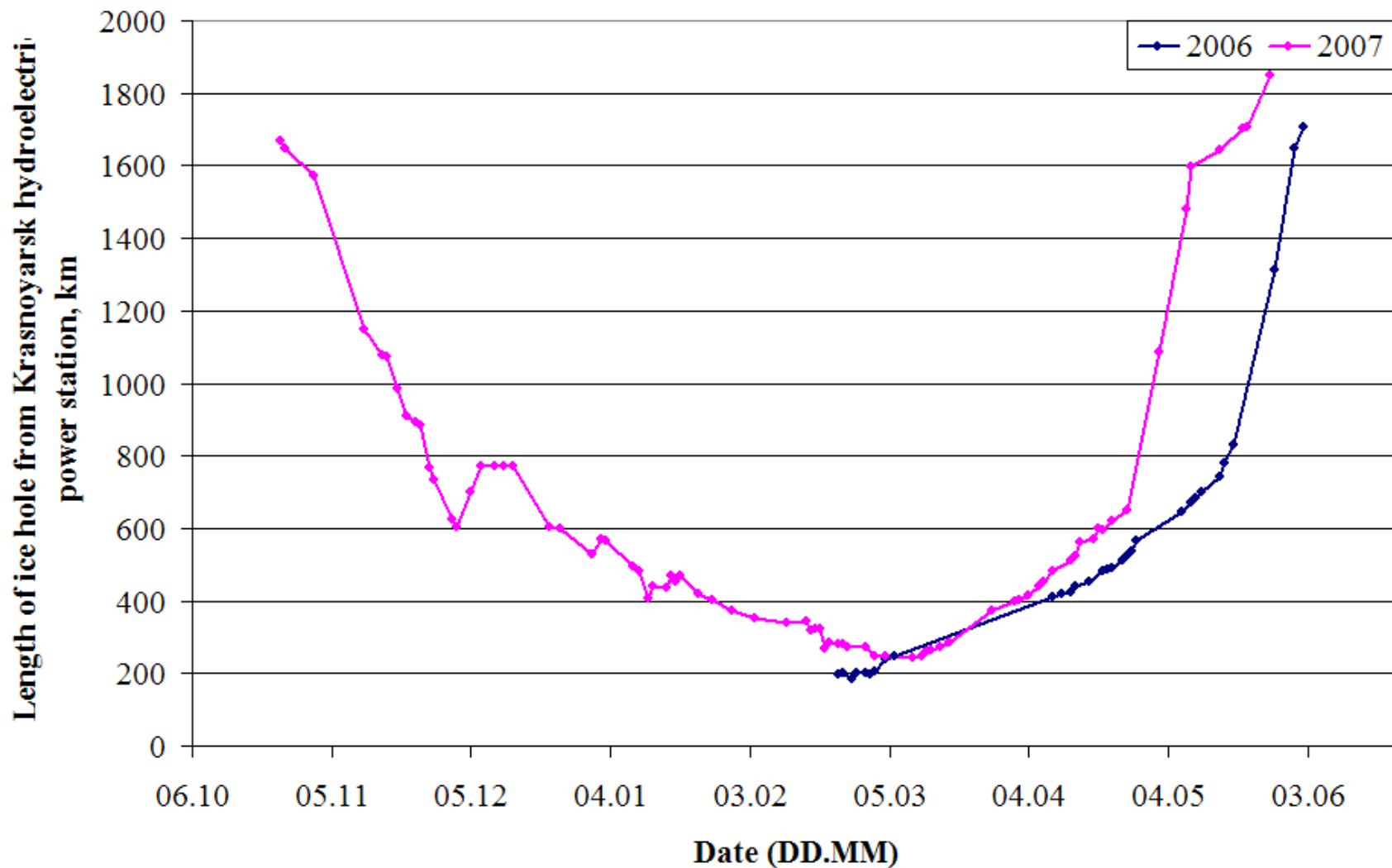
В качестве года-аналога можно задать реальный год с характеристиками погоды, близкими к средним многолетним за второй квартал. Так, если принять в качестве среднего года-аналога реальный год (по ходу суточных осадков и температуры воздуха во втором квартале), то критерий качества долгосрочного прогноза квартального притока по модели для Обского водохранилища составит **0.77** (аналог 1990г), для Красноярского **0.60** (аналог 1985г) (методика «удовлетворительная»).

ДОЛГОСРОЧНЫЕ ПРОГНОЗЫ МАКСИМАЛЬНЫХ УРОВНЕЙ ВОДЫ НА ЗАТОРООПАСНЫХ УЧАСТКАХ

Затор в районе с. Ворогово 2 мая 2007 г (Терра)



Движение кромки ледохода в 2006-2007 на ЕНИСЕЕ



Принципы построения моделей долгосрочного прогноза максимальных уровней воды :

**Подбор предикторов производится
на основе физического анализа
условий формирования
максимальных уровней воды**

**Для получения прогностических
уравнений используется
статистический метод
множественной линейной
регрессии**

ИСПОЛЬЗУЮТСЯ СЛЕДУЮЩИЕ ПРЕДИКТОРЫ:

**Температура воды ниже
плотины. Расстояние до
кромки ледостава, либо
величина продвижения
кромки ледостава.**

**Продолжительность
ледостава в пунктах,
расположенных на
небольшом
расстоянии от кромки.**

**Толщина льда.
Сбросы ГЭС.
Характеристики
уровней воды
(предледоставных и
зимних).**

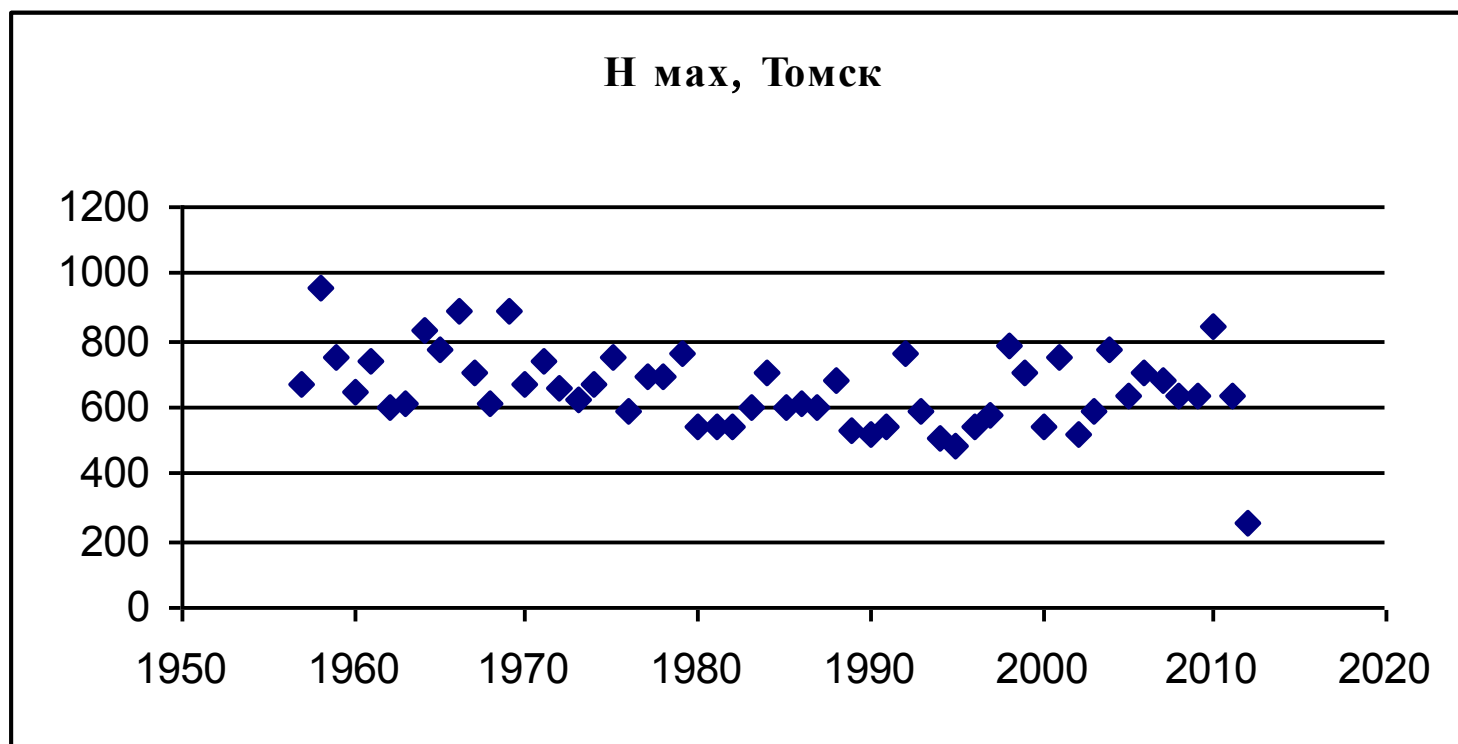
МЕТОД ПРОГНОЗА МАКСИМАЛЬНЫХ УРОВНЕЙ ВЕСЕННЕГО ПОЛОВОДЬЯ РЕКИ ТОМИ У Г. ТОМСКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ЕГО ПРИМЕНЕНИЯ НА ПРАКТИКЕ

(Д.А.Бураков, В.Ф. Космакова)



Максимальные уровни р. Томи у г. Томска (**НТомск-мах**) нередко связаны с заторами льда. Они формируются в апреле при прохождении первой, либо второй волны половодья. Средняя дата наступления максимального уровня воды на Томи у Томска – 5 мая; крайние: 17 апреля (2000), 4 июня (1975).

Самый высокий максимальный заторный уровень наблюдался в 1947 году – 1103 см (1958 г - 955).



За последние 40 лет выдающимся заторным оказался 2010 год, 29 апреля в южной части Томска у гидроствора (хвост затора) уровень воды поднялся примерно на 10,5 м, на 2 метра превысив опасную отметку. В зоне затопления оказался пригородный поселок Черная речка на левом берегу р. Томи. Здесь под воду ушли 270 жилых домов, из которых эвакуировано 1102 жителя. В центре города (в голове затора уровень воды составил 843 см).



Для организации хозяйственной деятельности и подготовки мероприятий по борьбе с наводнениями прогнозы максимума уровней воды р. Томи в районе г. Томска исключительно важны.

До 60-х годов заторные явления при вскрытии Томи ниже Томска наблюдались практически ежегодно. Вопрос о необходимости разработки метода прогноза максимальных весенних уровней воды р. Томи ставился И. И. Волковым еще в 1934 г.

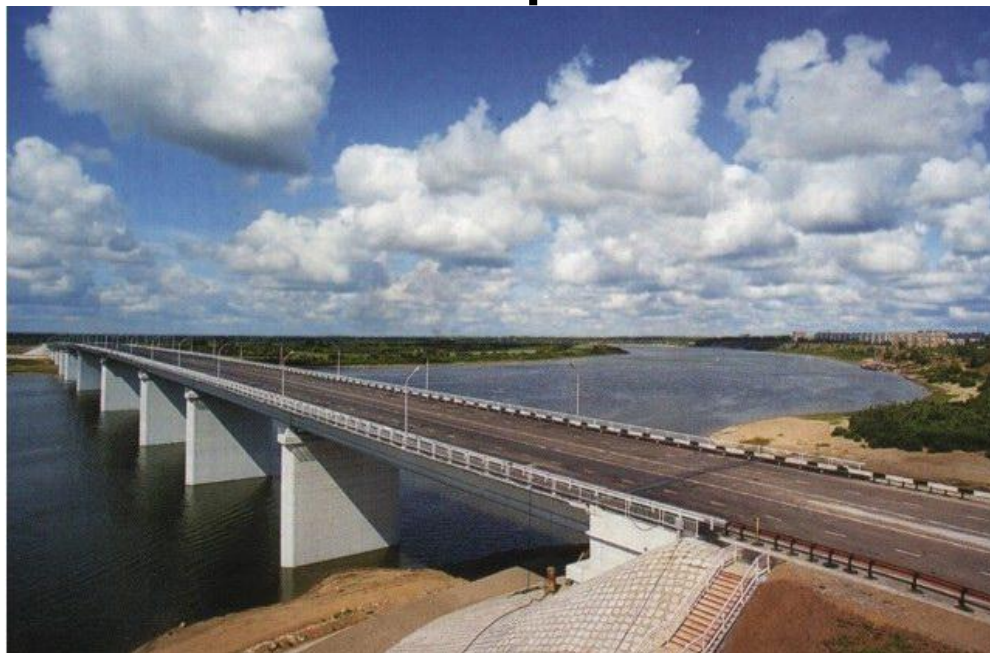
В начале 1950-х г Л. Г. Шуляковский проводил исследования заторных явлений на Томи ниже Томска. Он установил совокупность переменных для краткосрочного прогноза максимального уровня воды при заторе (ΔH_m).

Начальник Томской ГМС Я.И. Марусенко обратил внимание на влияние особенностей замерзания Томи, образования шуги под льдом и водности Томи в период замерзания.

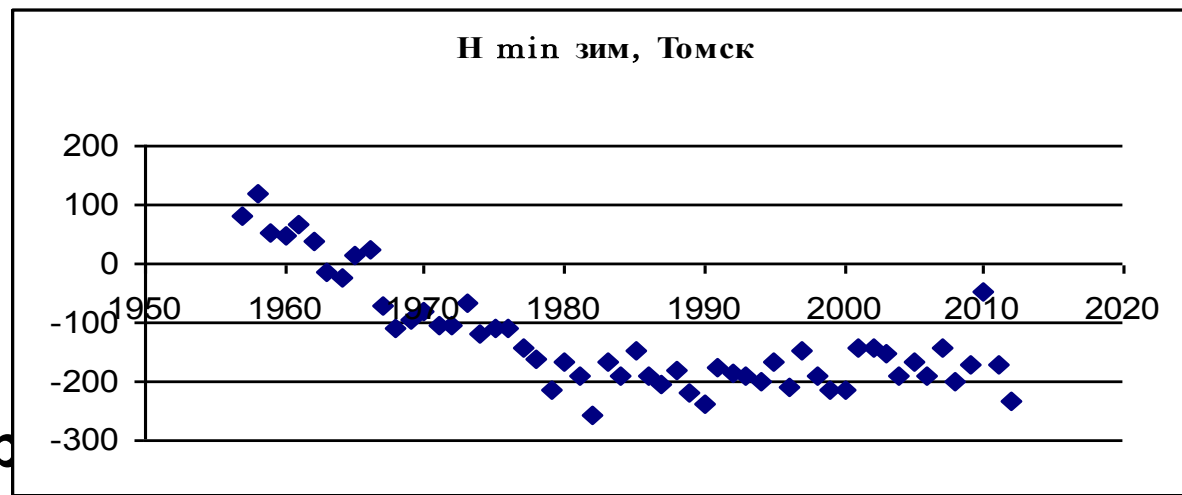
Очагом образования заторов была крутая излучина у с. Белобородово (в 15-и км ниже Томска).

В 60-70-е годы, из-за сбросов горячей воды Сибирским химическим комбинатом, построенным ниже г. Томска, заторообразование прекратилось.

За последние пол века в русле реки развернулась добыча гравия, возникли значительные деформации, уровни воды понизились (особенно в межень), изменились уклоны реки, возникли острова. Сбросы горячей воды в реку в районе с. Белобородово резко сократились из-за остановки ядерных реакторов. В 1990 г был построен новый автомобильный мост.



Все это способствовало возобновлению весенних заторов льда у г. Томска. Вновь возникла необходимость разработки метода прогноза.



Формирование половодья обусловлено гидрометеорологическими условиями, определяющими снегонакопление, количество и распределение во времени весенних осадков, ход интенсивности снеготаяния, особенности продвижения паводочной волны по руслу реки, а также местными особенностями морфологического строения русла. Атмосферные процессы и связанные с ними процессы весеннего ослабления прочности ледяного покрова и весенней прибыли воды носят инерционный характер, т.е. начальные тенденции их развития характеризуют последующий ход вскрытия реки, включая образование и мощность заторов льда.

Рассмотрим результаты, полученные для реки Томи в районе г. Томска. На основе регрессионного анализа разработаны следующие уравнения для прогноза максимального уровня (НТомск-мах):

для выпуска прогноза 10 апреля:

$$\text{НТомск-мах} = 0.659 \cdot S + 0.676 \cdot H_1 - (0.827 \cdot \Delta H_{2T} + 1.832 \cdot \Delta H_{3T}) + 0.605 \cdot \Delta H_{3K} + 3.053 \cdot X_1 + 26.224 \cdot \Delta \cdot t_1 + 601.122 \quad (1)$$

(показатели качества уравнения: коэффициент множественной корреляции $R = 0.881$, стандартный критерий качества методики прогноза $S/\sigma = 0.515$);

для уточнения прогноза 20 апреля:

$$\text{НТомск-мах} = 0.696 \cdot S + 0.718 \cdot H_1 - (0.219 \cdot \Delta H_{2T} + 1.892 \cdot \Delta H_{3T}) + (1.885 \cdot X_1 + 0.820 \cdot X_2) + (22.293 \cdot \Delta \cdot t_1 + 26.521 \cdot \Delta \cdot t_2) + 594.567 \quad (2)$$

(коэффициент множественной корреляции $R = 0.938$, стандартный критерий качества методики прогноза $S/\sigma = 0.367$).

Описание переменных и обобщенных показателей в уравнениях (1), (2)

Обозначение	Смысловое значение	Т – статистика	
		(1)	(2)
S	S – запас воды в снеге на 31 марта, Кузедеево	5.8	8.4
X₁	X₁ – сумма осадков за первую декаду апреля, Томск	2.7	2.7
X₂	X₂ = (X_{IV2Томск} + X_{IV2Кондома}) – сумма осадков за вторую декаду апреля, Томск и Кондома	–	4.0
Δt₁	Δt₁ = (0.430•t_{Кондома} - 0.570•t_{Томск}) – разность температуры воздуха за первую декаду апреля по Томску и Кондоме с весовыми коэффициентами (объяснение ниже по тексту)	4.2	4.6
Δt₂	Δt₂ = (0.470•t_{Кондома} - 0.530•t_{Томск}) разность температуры воздуха за вторую декаду апреля по Томску и Кондоме с весовыми коэффициентами (объяснение по тексту)	–	3.6
H₁	H₁ - минимальный зимний уровень воды, р. Томь – г. Томск; (объяснение ниже по тексту)	5.0	7.0
ΔH_{2Т}	ΔH_{2Т} = H_Т(20.03) - H_Т(10.03) – изменение (тенденция) уровней воды за указанные даты, р. Томь – г. Томск (объяснение по тексту)	-2.1	-0.7
ΔH_{3Т}	ΔH_{3Т} = H_Т(31.03) – H_Т(20.03) - изменение уровня воды за указанные даты, р. Томь – г. Томск (объяснение по тексту)	-4.5	-6.8
ΔH_{3К1}	ΔH_{3К} = H_К(31.03) - H_К(20.03) - изменение уровня воды за указанные даты, р. Томь – с. Козюлино (объяснение по тексту)	1.6	–

Какие же переменные характеризуют высоту подъема уровня воды у Томска?

В прогностических уравнениях присутствуют:

- Запасы снега и весенние осадки, влияющие на объем притока воды в русловую сеть.
- Разность температуры воздуха в пунктах Кондома и Томск (Δt_1 , Δt_2) – характеризует влияние соотношения теплового и механического факторов вскрытия.
- Изменение уровня воды за вторую и третью декады марта (ΔH_{2T} , ΔH_{3T}) – косвенно характеризует ход процесса потепления в начале весны.
- Минимальный уровень воды за зимний период – отражает осеннее увлажнение, ледовые условия (наличие зажоров льда), а также учитывает понижение уровней воды в результате добычи песчано-гравийной смеси в русле реки.

Рассмотрим результаты прогноза за последние годы

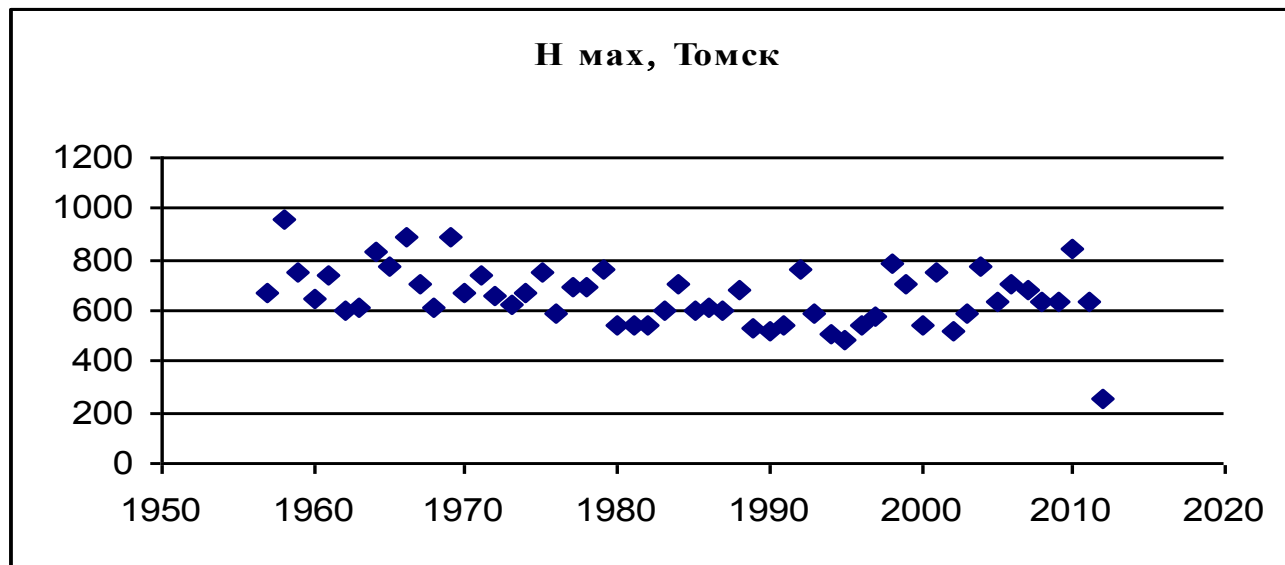
Результаты прогноза максимального уровня у г. Томска (доп. ошибка 72 см)

Год	$H_{\text{Томск-мах}}$ (измеренный)	Уравнение 1		Уравнение 2	
		Прогноз	Ошибка	Прогноз	Ошибка
2007	681	615	66	643	38
2008	631	541	90	589	42
2009	637	613	24	611	26
2010	843	795	48	762	81
2011	636	649	-13	604	32
2012	250	465	-215	488	-233

Метод прогноза используется на практике. Прогнозы, выданные в Гидрометеорологическом центре Западно-Сибирского УГМС в 2007 – 2011 гг в основном оправдались.

Остановимся отдельно на результате 2012 года

Прогноз в 2012 г (465 – 488 см) **правильно ориентировал на очень низкий уровень воды** (самый низкий уровень 486 см наблюдался в 1995 г).



Однако, **уникальные условия весны 2012 г** (низкие запасы снега, затяжное снеготаяние при весьма низком фоне температуры воздуха) **обусловили небывало низкий уровень воды у г. Томска – на 236 см ниже уровня 1995 г.**



**THIS IS THE END OF
PRESENTATION, LADIES AND
GENTLEMEN.**

**I SHOULD LIKE TO THANK YOU FOR
YOUR KIND ATTENTION.**