

Федеральная служба по гидрометеорологии  
и мониторингу окружающей среды (Росгидромет)

СРЕДНЕСИБИРСКОЕ МЕЖРЕГИОНАЛЬНОЕ ТЕРРИТОРИАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ  
ФЕДЕРАЛЬНОЙ СЛУЖБЫ ПО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ  
И МОНИТОРИНГУ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ  
(Среднесибирское УГМС)

ГОСУДАРСТВЕННОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ «СИБИРСКИЙ РЕГИОНАЛЬНЫЙ  
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ»  
(ГУ «СИБНИГМИ»)

УДК

№ Инв.

№ госрегистрации

СОГЛАСОВАНО

Руководитель Среднесибирского УГМС  
В.В. Еремин



« 15 » 01. 2008г

УТВЕРЖДАЮ

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



## О Т Ч Е Т О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

по тематике региональных исследований

**«Разработать и внедрить автоматизированную технологию долгосрочного  
прогноза ледовых явлений на реках Енисейского бассейна».**

(Тема 1.8.81)

Руководители темы:

К.ф.-м.н.

  
Еремин В.В.

Новосибирск 2007 г.

## СПИСОК ОСНОВНЫХ ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель  
темы, к.ф.-м.н.



В.В. Еремин (введение, разделы 1-3, заключение, руководство, постановка задачи, координация работ.)

Исполнители  
темы

---

С.М. Буц (раздел 1, формирование баз данных на основе оперативной и архивной гидрометеорологической информации, первичная обработка данных)

---

М.М. Еремина (разделы 1-3, разработка алгоритмов модели прогноза, разработка оперативной технологии прогнозирования, проведение авторских и оперативных испытаний, анализ результатов, написание отчета)

---

Л.И. Виноградова (раздел 2, 3, проведение авторских и оперативных испытаний, анализ результатов, написание отчета)

---

А. В. Мещерская (раздел 1, формирование базы исходных данных, разложение полей метеоэлементов по сферическим функциям)

---

Л.А. Младенцева (раздел 3, заключение, проведение оперативных испытаний, определение оценок качества прогнозов по модели, анализ результатов, написание отчета)

Нормоконтролер

---

Т.П. Панькова

## РЕФЕРАТ

Отчет 35 с., 1 ч., 3 рис., 6 табл., 8 источников, 3 прил.

### ВСКРЫТИЕ РЕК, ЛЕДООБРАЗОВАНИЕ, ЛЕДОСТАВ, ДОЛГОСРОЧНЫЙ ПРОГНОЗ, ЕСТЕСТВЕННЫЕ ОРТОГОНАЛЬНЫЕ ФУНКЦИИ, ГРЕБНЕВАЯ РЕГРЕССИЯ, ОПТИМАЛЬНЫЙ ВЕКТОР–ПРЕДИКТОР

Объектом исследования являются ледовые явления на реках енисейского бассейна.

Цель работы – разработать и внедрить автоматизированную технологию долгосрочного прогноза ледовых явлений на реках енисейского бассейна.

В процессе работы подготовлен банк данных на основе оперативной и архивной гидрометеорологической информации, разработан алгоритм модели прогноза и оперативная технология прогнозирования, написано программное обеспечение, реализующее технологический цикл, проведены авторские и оперативные испытания прогноза ледовых явлений на реках енисейского бассейна.

В результате исследований получен технологический блок долгосрочного прогноза ледовых явлений.

Внедрение – технология рекомендована к внедрению в оперативную практику в отделе гидрологических прогнозов Красноярского ЦГМС–Р.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 ФИЗИКО-СТАТИСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДОЛГОСРОЧНОГО ПРОГНОЗА ЛЕДОВЫХ ЯВЛЕНИЙ.....	6
2 ОЦЕНКА ПРОГНОСТИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ФИЗИКО- СТАТИСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДОЛГОСРОЧНОГО ПРОГНОЗА ЛЕДОВЫХ ЯВЛЕНИЙ. АВТОРСКИЕ ИСПЫТАНИЯ МОДЕЛИ.....	11
3 РЕЗУЛЬТАТЫ ОПЕРАТИВНЫХ ИСПЫТАНИЙ МОДЕЛИ В 2007 Г. РЕКОМЕНДАЦИИ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ В ОПЕРАТИВНОЙ ПРАКТИКЕ.....	17
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	24
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	25
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	26
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	30
ПРИЛОЖЕНИЕ В.....	33

## ВВЕДЕНИЕ

Долгосрочные ледовые прогнозы регулярно выпускаются в нашей стране с зимы 1940–1941 гг. Прогнозы составляются по всем основным (главным образом, судоходным) рекам и водохранилищам. Методы долгосрочных ледовых прогнозов основаны на учете зависимости сроков замерзания и вскрытия рек от условий формирования температурных аномалий в переходные сезоны года. Такие условия могут быть различными для рек различных климатических зон. Поэтому существует значительное число методов, различающихся как по географии объектов и заблаговременности прогнозов, так и по учитываемым характеристикам влияющих факторов, в большинстве случаев – атмосферных процессов.

Основные методы, применяемые в оперативной практике, описаны в «Руководстве по гидрологическим прогнозам» [1]. За последний период был выполнен ряд исследований в этой области. Одно из направлений исследований связано с наблюдающимся глобальным потеплением климата [2–6]. На реках европейской территории России и Западной Сибири появление льда в период с 1961 по 1990 гг. и замерзание рек происходило в среднем на 5–12 суток позже, чем в предыдущий 80-летний период, а вскрытие рек соответственно на 3–10 суток раньше.

Необходимость долгосрочного прогноза ледовых явлений на судоходных реках бассейна Енисея для практических народнохозяйственных задач очевидна. Целью данной работы является дополнение блоком прогноза ледовых явлений разработанной и внедренной в Среднесибирском УГМС технологии долгосрочного прогноза крупномасштабных аномалий погоды для территории ответственности управления.

# 1 ФИЗИКО-СТАТИСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДОЛГОСРОЧНОГО ПРОГНОЗА ЛЕДОВЫХ ЯВЛЕНИЙ

Методологической основой внедренной в Среднесибирском УГМС технологии долгосрочного прогноза является физико-статистический метод прогноза большей заблаговременности, созданный в отделе динамической метеорологии ГГО им. А.И.Воейкова под руководством профессора М.И.Юдина [7–8]. Ввиду того, что полное детерминированное описание многокомпонентной системы крупномасштабных процессов в атмосфере вряд ли возможно, развитие физико-статистического подхода к проблеме долгосрочного метеорологического прогнозирования является весьма значимым. Этот подход ассимилировал в себе все достижения в различных направлениях изучения крупномасштабной погоды, в нем сочетается физический, статистический и гидродинамический подходы.

Знание физических закономерностей находит отражение в начальном описании погодообразующих звеньев системы "атмосфера-океан-деятельный слой суши", выраженное в банках данных о состоянии системы. В связи с этим, существенны следующие требования, предъявляемые к исходной информации:

1) Полнота совокупности. Это требование означает, что совокупность предикторов должна характеризовать все основные особенности начального состояния физической системы, в которой развиваются крупномасштабные долговременно живущие процессы. Совершенно очевидно, что такую систему образуют атмосфера Земли, мировой океан и деятельный слой суши.

2) Информативность предикторов – предикторы должны содержать информацию о крупномасштабных процессах большой длительности. Достичь этого можно путем применения к исходным рядам параметров специальных преобразований, позволяющих выделить наиболее значимую часть информации. Поэтому все исходные параметры представлены в виде

коэффициентов разложения по естественным ортогональным составляющим. Дело в том, что крупномасштабность колебания тесно связана со временем релаксации атмосферных движений, т.е. чем больше масштаб, тем больше время жизни возмущения определенного знака. Колебания небольших масштабов являются в задаче долгосрочного прогноза попросту шумами, и их учет может внести искажения в реальную картину процесса. Считается, что к главным колебаниям можно относить компоненты, содержащие от 60 до 80 процентов дисперсии исходной информации.

3) Учет статистической неоднородности процессов внутри месяца. Этот принцип очень важен, т.к. смена характера атмосферной циркуляции часто происходит внутри периода, по которому осуществляется осреднение. Использование дисперсий основных параметров в качестве предикторов позволяет, в известной мере, учесть это ограничение.

Базовая часть архива предикторов (архив ГГО), состоящая из параметров, описывающих состояние системы "атмосфера-океан-деятельный слой суши" на всем северном полушарии, пополняется два раза в год. Это дает возможность производить модельные расчеты также два раза в год, в феврале – для весенне-летнего сезона и в августе – для осенне-зимнего. Десятилетний опыт эксплуатации модели в Среднесибирском УГМС подтвердил целесообразность такого технологического цикла. Хотя заблаговременность прогноза для последних месяцев сезона существенно больше, чем для первых, на качестве прогноза это не отражается. Часть предикторов, состоящая из параметров, характеризующих регион прогноза, поступают в архив ежемесячно. Однако эксперименты по уточнению сезонных прогнозов с учетом только этой дополнительной информации не показали заметного улучшения качества.

Известные трудности статистического моделирования в долгосрочном прогнозе связаны с весьма ограниченной длиной выборки и большой степенью коррелированности предикторов. Контроль качества восстановления в процессе

построения прогностического правила на основе некоей оптимальной совокупности параметров предполагает наличие независимой выборки, что практически неосуществимо из-за небольшой длины рядов наблюдений. В связи с этим, при выборе предикторов, было предложено воспользоваться оценкой «скользящий контроль». При применении этой оценки из обучающей последовательности, которой является вся выборка, последовательно исключается одна ситуация и по выборке меньшей длины минимизируется функция качества. Затем исключенная ситуация включается в выборку, а исключается следующая ситуация и т.д., до момента полного перебора всех ситуаций. На основе минимизации предложенной оценки можно провести и упорядочивание параметров, и определение их оптимального числа.

Параллельно с введением в технологию расчетов "скользящего контроля" применяется метод "ридж-оценки" или гребневой регрессии. Гребневая регрессия является частным случаем общего подхода в решении некорректных задач методом регуляризации. Некорректность задачи вытекает из наличия плохо обусловленного оператора – обратной корреляционной матрицы в регрессионном соотношении, что делает невозможным получение устойчивого решения. Плохая обращаемость матрицы, возникающая как следствие корреляции предикторов между собой, не может быть устранена в задачах прогноза погоды исключением из отбора оптимальной совокупности взаимосвязанных параметров, т.к. сама эта взаимосвязанность обусловлена спецификой изучаемой системы. Регуляризация позволяет получить корректное решение задачи прогноза без ущерба для информативности исходных данных.

Сравнение оценок качества прогноза на основе гребневой регрессии и метода наименьших квадратов показало заметное преимущество первого. Задача определения параметра регуляризации решается с использованием сочетания структурной минимизации эмпирического риска и метода просеивания. Исследования качества восстановления с использованием

статистической регуляризации показали, что характерной особенностью зависимости эмпирического риска от значения параметра регуляризации является наличие плохого минимума, который расположен в интервале от 0,4 до 0,9. Ошибки восстановления слабо меняются в указанном интервале. Этот эффект значительно упрощает вычислительный алгоритм, т.к. позволяет исключить поиск оптимального значения без значительной потери точности, введя в модельные расчеты фиксированную величину параметра регуляризации равную 0,5. Следовательно, основной задачей при построении прогностических соотношений остается поиск оптимального вектора – предиктора.

Формирование оптимального вектора-предиктора осуществляется на основе широко используемого в задачах статистического прогнозирования метода просеивания, т.е. упорядоченного перебора всей совокупности предикторов. На первом шаге находится первый предиктор по максимальному коэффициенту корреляции, а затем, поиск ведется по минимальному значению функции эмпирического риска. Возникает вопрос о единственности оптимальной совокупности. Экспериментально было показано, что может быть получено определенное множество решающих правил, обладающих близкими средними оценками качества независимого прогноза. Преимущество одного из них перед другими при прогнозе на конкретный год невозможно определить. Возникшую неопределенность в принятии решения предлагалось устранить методом неформального комплексирования, основанного на визуальной оценке наиболее вероятного прогностического значения. Было показано, что этот способ приводит к устойчивому повышению качества прогноза по сравнению с индивидуальным решением. При этом, однако, возникала неопределенность, связанная с некоторым субъективизмом визуальной оценки графического отображения коллектива решающих правил.

При наличии большого числа прогнозов за длительный совместный период можно построить линейную множественную регрессию на основании

вышеописанных алгоритмов для определения итогового решения. На определенном этапе эксплуатации модели и развития вычислительной базы был осуществлен этот подход. Технология модельных расчетов была модернизирована с учетом предыдущих разработок. С применением гребневой регрессии на основе случайного выбора составляется коллектив совокупностей предикторов, состоящих из определенного числа и набора параметров. Модельные эксперименты показали, что такие совокупности эквивалентны в смысле качества восстановления, если содержат достаточно большое количество параметров ( $n = 50$ ) из представленных в обучающей выборке. Возникающая при таком большом числе предикторов плохая обусловленность обратной матрицы исправляется механизмом регуляризации. Таким образом, удается получить ряды прогнозов для фиксированных совокупностей предикторов и построить линейную множественную регрессию для определения итогового решения. Такая вычислительная технология, реализующая физико-статистическую модель прогноза на сезон полей температуры и количества осадков (с декадной и месячной детализацией), находится в оперативном использовании в Среднесибирском УГМС более 10 лет.

В данной работе сделана попытка расширить круг прогнозируемых явлений за счет прогноза дат вскрытия, ледообразования и ледостава и показать принципиальную возможность их долгосрочного предсказания. Было разработано программное обеспечение прогноза ледовых явлений на основе действующей модели, дополнена база исходных данных, описывающих состояние системы "атмосфера – океан - деятельный слой суши", текущей информацией. Проведено разложение полей метеоэлементов (Северное полушарие) по сферическим функциям, получен комплекс предикторов модели. Создана база данных ледовых явлений для 24 пунктов, расположенных на 10 реках енисейского бассейна.

## 2 ОЦЕНКА ПРОГНОСТИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ФИЗИКО-СТАТИСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДОЛГОСРОЧНОГО ПРОГНОЗА ЛЕДОВЫХ ЯВЛЕНИЙ. АВТОРСКИЕ ИСПЫТАНИЯ МОДЕЛИ

Анализ прогностических возможностей модели проводился на независимом материале 1994–2006 годов. Необходимо отметить, что за это период чаще, чем обычно, весенне-осенние сезоны характеризовались положительными аномалиями температуры воздуха, что, безусловно, сказалось на условиях формирования ледовых явлений. Наблюдался значительный сдвиг дат вскрытия на более ранние относительно нормы сроки, и соответственно дат ледообразования и ледостава – на более поздние. К сожалению, аномальные условия формирования ледовых явлений не всегда адекватно отражаются модельным прогнозом. Необходимо также заметить, что естественный гидрологический режим нарушается хозяйственной деятельностью человека, что невозможно предусмотреть алгоритмом прогноза.

Модельные расчеты прогностических дат наступления ледовых явлений могут производиться в середине февраля, по мере готовности архива предикторов – коэффициентов разложения полей метеопараметров по естественным ортогональным функциям. Это дает возможность с большой заблаговременностью определить условия протекания всего навигационного периода. Таким образом, прогноз дат вскрытия имеет заблаговременность, в среднем, от двух до трех месяцев, ледообразования – восемь месяцев, а ледостава – девять. Именно такую заблаговременность имеют прогнозы, участвовавшие в определении показателей успешности модели.

В таблице 1 приведена оправдываемость прогнозов дат вскрытия. Для подавляющего числа пунктов (67%) оправдываемость этих прогнозов ниже 50%. Из анализа таблицы видно, что оправдываемость прогноза дат вскрытия

невысокая, даже для пунктов (Игарка, Назимово, Кызыл), прогноз по которым имеет оправдываемость методического прогноза выше климатического (в среднем на 14%).

Таблица 1 – Оправдываемость прогнозов вскрытия

Река	Пункт	Абс.ош. методического прогноза, дни	Опр-ть методического прогноза, %	Опр-ть климатического прогноза, %
Енисей	Дудинка	5	57,1	64,3
Енисей	Игарка	6	57,1	42,9
П.Тунгуска	Ванавара	6	50,0	78,6
П.Тунгуска	Байкит	6	64,3	78,6
П.Тунгуска	Кузьмовка	6	64,3	86,7
Н.Тунгуска	Б.Порог	6	57,1	85,7
Н.Тунгуска	Тура	7	35,7	50,0
Енисей	В.Имбатск	8	35,7	57,1
Енисей	П.Тунгуска	9	35,7	42,9
Енисей	Селиваниха	7	35,7	64,3
Енисей	Ворогово	8	42,9	64,3
Енисей	Ярцево	8	28,6	50,0
Енисей	Назимово	7	57,1	42,9
Енисей	Ос.Порог	8	35,7	57,1
Кан	Канск	7	35,7	57,1
Енисей	Кызыл	7	57,1	42,9
Туба	Бугуртак	6	42,9	50,0
Б.Пит	Брянка	7	50,0	64,3
Абакан	Абаза	8	42,9	50,0
Ангара	Богучаны	7	42,9	57,1
Тасеева	Машуковка	7	21,4	64,3
средняя		7	45,3	59,7

Для пунктов Байкит, Кузьмовка, расположенных на реке Подкаменная Тунгуска, качество прогноза наиболее высокое из всего ряда (64%), но по отношению к климатическому прогнозу – проигрывает.

Как уже отмечалось, естественный гидрологический режим может нарушаться. При вскрытии рек при возникновении угрозы подтопления происходит искусственное разрушение льда. Это обстоятельство затрудняет проведение анализа успешности прогнозов дат вскрытия.

На рисунке 1 представлены фактические, прогностические и климатические даты вскрытия рек за период 1994–2007 гг. для пункта Игарка р. Енисей. Вскрытие за этот период чаще наблюдалось более раннее (62% случаев).

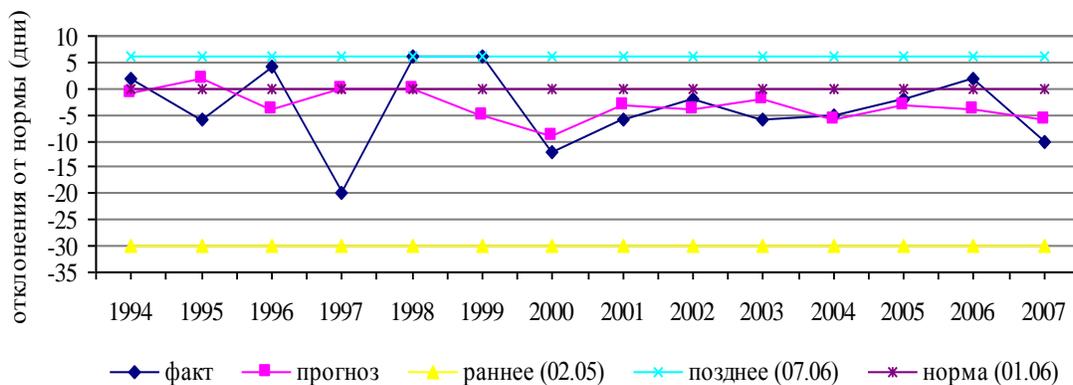


Рисунок 1 - Даты вскрытия для пункта Игарка р. Енисей

Аналогичные графики для других пунктов приведены в приложении А.

В среднем, наиболее удачными можно считать прогнозы ледообразования для пунктов нижнего течения Енисея (оправдываемость – 69–84%), см. таблицу 2.

Таблица 2 – Оправдываемость прогнозов ледообразования

Река	Пункт	Абс.ош. методического прогноза, дни	Опр-ть методического прогноза, %	Опр-ть климатического прогноза, %
Енисей	Дудинка	5	69,2	53,8
Енисей	Игарка	3	84,6	69,2
П.Тунгуска	Кузьмовка	5	53,8	61,5
Н.Тунгуска	Б.Порог	5	69,2	69,2
Н.Тунгуска	Тура	5	61,5	69,2
Енисей	В.Имбатск	5	53,8	53,8
Енисей	П.Тунгуска	5	69,2	76,9
Енисей	Селиваниха	5	61,5	76,9
Енисей	Ворогово	6	53,8	23,1
Енисей	Ярцево	5	61,5	61,5
Енисей	Назимово	5	61,5	53,8
Енисей	Ос.Порог	4	69,2	53,8
Кан	Канск	6	53,8	69,2
Енисей	Кызыл	5	46,2	76,9
Средняя		5	62,1	62,1

Из анализа таблицы видно, что наиболее удачными прогнозами дат ледообразования являются прогнозы по пункту Игарка с оправдываемостью 84,6%, что превышает оправдываемость климатического прогноза на 15%. «Выигрыш» модельного прогноза у климатического также существенен для пунктов Осинный Порог и Дудинка. Для других пунктов оправдываемость модельного прогноза – на уровне климатического, либо уступает ему.

На рисунке 2 представлены даты фактического наступления ледообразования, прогностические даты и климатические за период 1994–2006 гг. по пункту Игарка р. Енисей. Хорошо видно, что за этот период чаще (в 67% случаев) наблюдалось более позднее ледообразование, что является отражением процесса общего потепления, отмеченного и другими исследователями [2–6].

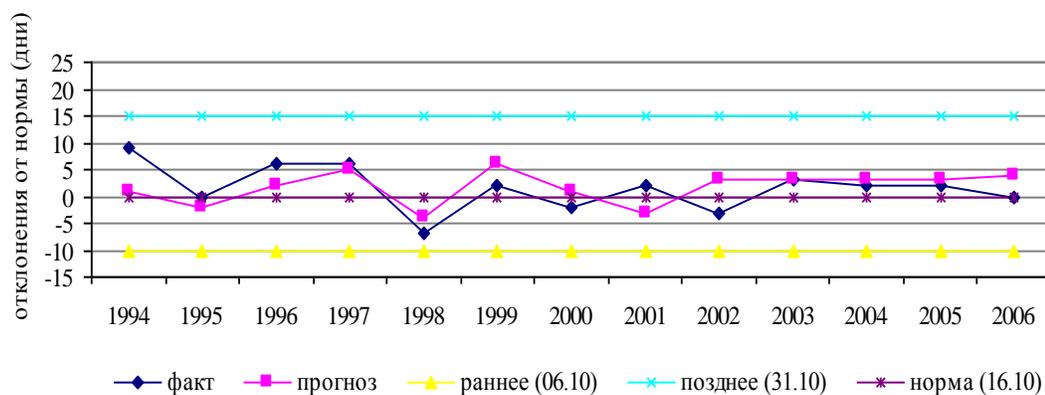


Рисунок 2 - Даты ледообразования для пункта Игарка р. Енисей

Более раннее по отношению к климатической норме наступление ледообразования за период 1994–2006 гг. наблюдалось чаще также и для других пунктов в среднем в 60–70% случаев (графики приведены в приложении Б).

В таблице 3 приведена оправдываемость прогноза дат наступления ледостава. Из таблицы видно, что достоверность методического прогноза дат ледостава для пунктов нижнего течения Енисея относительно близка к оправдываемости климатического прогноза (62–69%).

Таблица 3 – Оправдываемость прогнозов ледостава

Река	Пункт	Абс.ош. методического прогноза, дни	Опр-ть методического прогноза, %	Опр-ть климатического прогноза, %
Енисей	Дудинка	5	61,5	69,2
Енисей	Игарка	5	69,2	76,9
П.Тунгуска	Кузьмовка	6	53,8	53,8
Н.Тунгуска	Б.Порог	5	61,5	76,9
Н.Тунгуска	Тура	6	46,2	76,9
Енисей	В.Имбатск	10	46,2	41,7
Енисей	П.Тунгуска	11	38,5	38,5
Енисей	Селиваниха	7	46,2	38,5
Енисей	Ворогово	13	15,4	41,7
Енисей	Ярцево	14	7,7	38,5
Енисей	Назимово	14	15,4	23,1
Енисей	Ос.Порог	13	33,3	41,7
Кан	Канск	9	15,4	53,8
Енисей	КЫЗЫЛ	9	30,8	38,5
Средняя		9	38,7	50,7

Для пунктов среднего течения Енисея на процессах ледообразования и ледостава сказывается влияние зарегулированности речного стока Енисея. Большой объем теплой воды, поступающий через плотину в нижний бьеф Красноярской ГЭС, поддерживает существование полыньи большой протяженности. Продвижение кромки ледостава вверх по течению находится в прямой зависимости от объема сброса. Для пунктов, попадающих под влияние полыньи, оправдываемость прогнозов как методических, так и климатических существенно ниже.

На рисунке 3 представлены даты за период 1994–2006 гг. по пункту Игарка р. Енисей. Ледостав, как и ледообразование, в этот период чаще наблюдался более поздний.

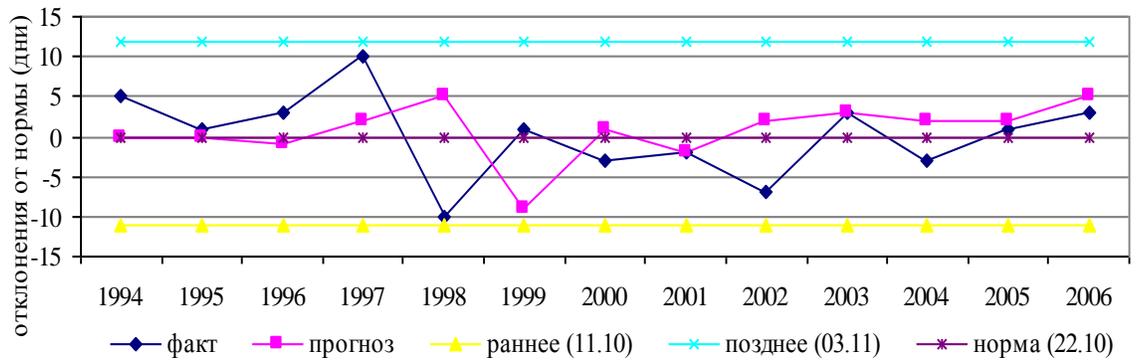


Рисунок 3 - Даты ледостава для пункта Игарка р. Енисей

Подобные графики, отражающие фактические, прогностические и климатические даты наступления ледостава за тот же период для других пунктов приведены в приложении В.

### 3 РЕЗУЛЬТАТЫ ОПЕРАТИВНЫХ ИСПЫТАНИЙ МОДЕЛИ В 2007 Г. РЕКОМЕНДАЦИИ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ В ОПЕРАТИВНОЙ ПРАКТИКЕ

Оперативные испытания технологии прогноза ледовых явлений проводилось в отделе гидрологических прогнозов Красноярского ЦГМС-Р в 2007г.

Остановимся более подробно на погодных условиях формирования вскрытия, ледообразования и ледостава, а также на фактическом характере протекания этих явлений на реках бассейна Енисея.

Прошедшая зима на территории бассейна Енисея была теплой (суровость зимы по сумме отрицательных температур воздуха с ноября по март составила 74–83% нормы). Средняя температура воздуха в марте, на большей части этой территории, была на 1–3° выше нормы, только в Эвенкии – ниже нормы на 1–1,5°. Средняя за апрель температура воздуха была на 4–10° выше нормы на всей территории бассейна Енисея. В первой декаде апреля средняя температура воздуха оказалась выше нормы на 5–11°, что привело к раннему вскрытию рек.

Толщина льда на Енисее у г. Енисейска и у с. Ярцево была наименьшей за период наблюдений. Аномально теплый март и начало апреля (среднесуточные температуры воздуха была на 1–7° выше нормы) и наличие тонкого льда – все это способствовало раннему вскрытию. На 9 дней раньше нормы 7 апреля произошло вскрытие Енисея у г.Енисейска. В течение 10 дней наблюдался средний ледоход. Далее кромка ледохода продвигалась вниз по течению относительно быстро. Участок от устья р.Б.Пит до с. Ярцево вскрылся 15–25 апреля, что на 6-11 дней раньше нормы. 25 апреля, на 11 дней раньше нормы, произошло вскрытие у с. Ярцево. Вскрытие сопровождалось затором льда, образовавшимся ниже с. Ярцево. Затор льда ниже с. Ярцево сохранялся с 25 апреля по 1 мая. 30 апреля, на 15 дней раньше нормы, начался ледоход у д.

Бахта, а выше по течению сохранялся ледостав. 2 мая, на 8 дней раньше нормы, начался ледоход у с. Ворогово. Вскрытие сопровождалось опасным затором льда. Наблюдалось подтопление пониженных участков местности, дорог. Затор льда ниже с. Ворогово был разрушен искусственно. 3–7 мая, на 13–18 дней раньше нормы, произошло вскрытие Енисея на участке с. Верхнеимбатск – с. Курейка. 22 мая, на 9 дней раньше нормы, произошло вскрытие Енисея у г. Игарка. 26–30 мая произошло вскрытие на участке с. Потапово – г. Дудинка, что на 7–9 дней раньше нормы. Вскрытие Нижнего Енисея сопровождалось неопасными заторами льда. Лед в районе г. Дудинка был частично искусственно разрушен.

Вскрытие Подкаменной Тунгуски на участке с. Байкит – с. Суломой началось 29–30 апреля, на 13–15 дней раньше нормы. 1–2 мая вскрытие произошло на участке с. Ванавара – ф. Усть–Камо. Вскрытие сопровождалось неопасными заторами льда. 11–13 мая, на 9–10 дней раньше нормы, произошло вскрытие Нижней Тунгуски на участке п. Тура – ф.Б.Порог.

Большая адвекция тепла в первой половине апреля нарушила кристаллическую структуру ледяного покрова и 17 апреля, на 23 дня раньше нормы, на р. Ангара произошло вскрытие в результате размыва льда у с. Кежма. В течение 7 дней здесь наблюдался средний ледоход. 23 апреля, в сроки, близкие к экстремально ранним, началось вскрытие устьевого участка Ангары. 1 мая, на 12 дней раньше нормы, произошло вскрытие Ангары у с. Богучаны. Вскрытие Ангары на участке д. Каменка – с. Рыбное произошло 2–4 мая, на 9–12 дней раньше нормы.

В верхней части бассейна р. Енисей также отмечалось раннее вскрытие рек. В результате размыва льда 9 апреля произошло вскрытие р. Енисей у г. Кызыла. Это экстремально ранний срок за период наблюдений с 1936 года. 7–10 апреля, на 8–12 дней раньше нормы, произошло вскрытие рек Абакан, Туба. На р. Абакан у г. Абаза лед был искусственно разрушен. Вскрытие р. Туба и ее

притоков сопровождалось неопасными заторами льда. 13–18 апреля, на 8–10 дней раньше нормы, произошло вскрытие р. Кан.

В таблице 4 приведены результаты оперативных испытаний прогноза дат вскрытия.

Таблица 4 – Результаты оперативных испытаний прогноза дат вскрытия рек бассейна Енисея за 2007 г.

Река - пункт	Прогноз	Факт	Норма	Ошибка, дни
Енисей - Дудинка	31.05	30.05	6.06	-1
Енисей – Игарка	26.05	22.05	1.06	-4
Подкаменная Тунгуска - Ванавара	8.05	2.05	13.05	-6
Подкаменная Тунгуска – Байкит	8.05	29.04	12.05	-9
Подкаменная Тунгуска – Кузьмовка	9.05	29.04	14.05	-10
Нижняя Тунгуска – Б. Порог	13.05	13.05	22.05	0
Нижняя Тунгуска – Тура	12.05	11.05	20.05	-1
Енисей – Верхнеимбатское	11.05	3.05	16.05	-8
Енисей – Подкаменная Тунгуска	8.05	29.04	11.05	-9
Енисей – Селиваниха	14.05	4.05	22.05	-10
Енисей – Ворогово	9.05	2.05	10.05	-7
Енисей – Ярцево	6.05	25.04	6.05	-11
Енисей – Назимово	3.05	22.04	30.04	-11
Енисей – Осиновский Порог	9.05	1.05	13.05	-8
Кан – Канск	24.04	15.04	24.04	-9
Енисей – Кызыл	28.04	9.04	26.04	-19
Туба – Бугуртак	19.04	9.04	17.04	-10
Большой Пит – Брянка	8.05	28.04	11.05	-10
Абакан – Абаза	22.04	10.04	22.04	-12
Ангара – Богучаны	12.05	1.05	13.05	-11
Тасеева – Машуковка	2.05	23.04	1.05	-9

По методическому прогнозу вскрытие р. Енисей и притоков ожидалось, в основном, на 1–9 дней раньше нормы. Фактически вскрытие произошло на 8–18 дней раньше нормы, что было обусловлено аномально теплой весной, но тенденция раннего вскрытия с заблаговременностью около 3 месяцев была спрогнозирована верно.

Ледообразование и ледостав на реках бассейна Енисея проходил в условиях теплой осени и начала зимы. Средняя температура воздуха в октябре была выше нормы на 1–2°, в ноябре – на 3–5° в декабре на 6–8 ° выше нормы.

Аномально теплая погода способствовала позднему появлению шуги и установлению ледостава на р. Енисей и его притоках.

9–16 октября, на 1–4 дня позже нормы, появились первые ледяные образования на реках Нижняя и Подкаменная Тунгуски. 25–28 октября, на 5–9 дней позже нормы, на этих реках установился ледостав.

18–24 октября, на 6–10 дней позже нормы, появилась шуга на Енисее, на участке д.Бахта – г.Дудинка. На участке пгт.Стрелка – с.Ярцево ледообразование началось 24–30 октября, на 2–7 дней позже нормы. 30–31 октября, на 7–15 дней позже нормы, шуга появилась на участке с.Ворогово – Осиновский Порог. 27 октября, на 4 дня позже нормы, появилась шуга на р.Енисей у г.Кызыл.

24–27 октября, на 2–7 дней позже нормы, началось ледообразование на Ангаре, на участке с.Кежма – устье. 27 октября, на 4 дня позже нормы, появилась шуга на р.Кан.

4, 9 ноября, в экстремально поздние сроки установился ледостав на р. Енисей у г.Дудинка и г.Игарка. На вышерасположенном участке с.Курейка – с.Бахта ледостав установился 11–20 ноября, на 9–15 дней позже нормы. 20 ноября, на 1–3 дня позже нормы установился ледостав на участке с.Ворогово – Осиновский Порог. 23 ноября, на 3 дня позже нормы установился ледостав р. Енисей у г. Кызыл. Уровни воды установления ледостава были нормальными.

12 ноября, на 7 дней позже нормы установился ледостав на р.Кан.

12–13 ноября, в экстремально поздние сроки установился ледостав на р.Подкаменная Тунгуска, на участке с. Байкит – с.Кузьмовка.

15 декабря, в экстремально поздний срок установился ледостав на Енисее у д.Подкаменная Тунгуска. Установление ледостава на участке с.Ярцево – с.Назимово произошло 12–17 декабря, на 14–17 дней позже нормы. Установление ледостава на участке с.Ярцево – с.Ворогово сопровождалось неоднократными подвижками льда, резкими подъемами уровней воды. Кромка

льда на Енисее в конце года приближалась к г.Енисейск, в прошлом году она была в 70 км ниже г.Енисейска.

По методическому прогнозу ледообразование Нижнего Енисея на участке г.Дудинка – Осиновский порог ожидалось на 4–9 дней позже нормы. Фактически ледообразование, в основном, было на 1–9 дней позже нормы, только в Подкаменной Тунгуске в норме, в Ворогово в экстремально поздний срок. На Подкаменной и Нижней Тунгусках появление шуги ожидалось в сроки близкие к норме. Фактически появление шуги на этих реках отмечалось в сроки близкие к норме и на 1–2 дня позже нормы. Ледообразование на Верхнем Енисее у г. Кызыла и на р. Кан у г.Канска ожидалось позже нормы на 4 дня, что фактически и наблюдалось. Средняя оправдываемость прогнозов ледообразования была хорошей и составила 86%.

В таблице 5 приведены результаты оперативных испытаний прогноза дат ледообразования.

Таблица 5 – Результаты оперативных испытаний прогноза дат ледообразования рек бассейна Енисея за 2007 г.

Река – пункт	Прогноз	Факт	Норма	Ошибка
Енисей - Дудинка	20.10	24.10	15.10	4
Енисей – Игарка	20.10	22.10	16.10	2
Подкаменная Тунгуска – Кузьмовка	10.10	10.10	10.10	0
Нижняя Тунгуска – Большой Порог	12.10	16.10	12.10	4
Нижняя Тунгуска – Тура	5.10	9.10	7.10	4
Енисей – Верхнеимбатское	19.10	23.10	15.10	4
Енисей – Подкаменная Тунгуска	23.10	17.10	17.10	-6
Енисей – Селиваниха	14.10	23.10	14.10	9
Енисей – Ворогово	22.10	11.11	16.10	19
Енисей – Ярцево	29.10	28.10	21.10	-1
Енисей – Назимово	30.10	30.10	24.10	0
Енисей – Осиновский Порог	28.10	30.10	19.10	2
Кан – Канск	27.10	27.10	23.10	0
Енисей – Кызыл	27.10	27.10	23.10	0

Прогнозы ледообразования имеют важное значение для нужд речного флота в завершающий период навигации. Они позволяют правильно

спланировать время ее окончания. Ледообразование в этом году ожидалось позже нормы, что позволило каравану судов совершить дополнительный рейс на север до г.Игарка. План грузоперевозок в этом году выполнен на 102%. Общий объем грузоперевозок за навигацию составил 3 миллиона 280 тысяч тонн (в прошлом году 3 миллиона 87 тысяч тонн).

Установление ледостава на Енисее, Подкаменной и Нижней Тунгусках, а также р.Кан по модельному прогнозу ожидалось на 1–11 дней позже нормы. Фактически установление ледостава произошло на 1–23 дня позже нормы. На Енисее у д.Подкаменная Тунгуска, у г.Игарка и г.Дудинка, на р.Подкаменная Тунгуска у с.Кузьмовка и на р.Нижняя Тунгуска у п.Тура ледостав установился в экстремально поздние сроки. Средняя оправдываемость прогнозов ледостава составила 64%.

В таблице 6 приведены результаты оперативных испытаний прогноза дат ледообразования.

Таблица 6 – Результаты оперативных испытаний прогноза дат ледообразования рек бассейна Енисея за 2007 г.

Река – пункт	Прогноз	Факт	Норма	Ошибка
Енисей - Дудинка	28.10	4.11	23.10	7
Енисей – Игарка	30.10	9.11	22.10	10
Подкаменная Тунгуска – Кузьмовка	9.11	13.11	31.10	4
Нижняя Тунгуска – Большой Порог	3.11	28.10	25.10	6
Нижняя Тунгуска – Тура	25.10	11.11	20.10	17
Енисей – Верхнеимбатское	19.11	20.11	11.11	1
Енисей – Подкаменная Тунгуска	27.11	15.12	22.11	-18
Енисей – Селиваниха	12.11	15.11	1.11	3
Енисей – Ворогово	21.11	20.11	19.11	1
Енисей – Ярцево	27.11	2.12	25.11	-5
Енисей – Назимово	3.12	17.12	3.12	-14
Енисей – Осиновский Порог	18.11	20.11	17.11	2
Кан – Канск	11.11	12.11	5.11	1
Енисей – Кызыл	27.11	23.11	20.11	4

С учетом того, что заблаговременность прогнозов ледообразования и ледостава составляет 9 и более месяцев, верно спрогнозированная тенденция

(раньше или позже нормы начала ледовых явлений) является большим преимуществом этого метода. При такой заблаговременности ошибка прогноза более 5 дней, которая является пороговой при оценке прогноза, можно считать несущественной. Поэтому даже при невысокой оправдываемости качество прогноза можно считать удовлетворительным.

В целом, разработанный метод может быть рекомендован для использования в качестве консультационного при составлении долгосрочных оперативных прогнозов ледовых явлений на реках бассейна Енисея.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Принимая во внимание полученные результаты, можно сделать вывод о принципиальной возможности прогноза ледовых явлений большой заблаговременности с помощью физико-статистического моделирования, хотя, видимо, есть определенные границы применимости изложенного подхода. Очевидно, выбранная система предикторов недостаточно отражает сложность физических процессов, соответствующих ледовым явлениям на реках. Необходимы дополнительные исследования, направленные на проведение анализа содержания системы предикторов с позиций построения физической теории предвычисления дат вскрытия, ледообразования, ледостава. Предлагается также в качестве предиктанта использовать период открытой воды (период от момента вскрытия до момента ледообразования). Следует ожидать, что эта величина будет более инерционной, так как тепловые свойства водоема формируются в результате длительного воздействия погодных процессов. Дата же замерзания будет определена как прогностическая или же фактическая дата вскрытия плюс прогностический период открытой воды.

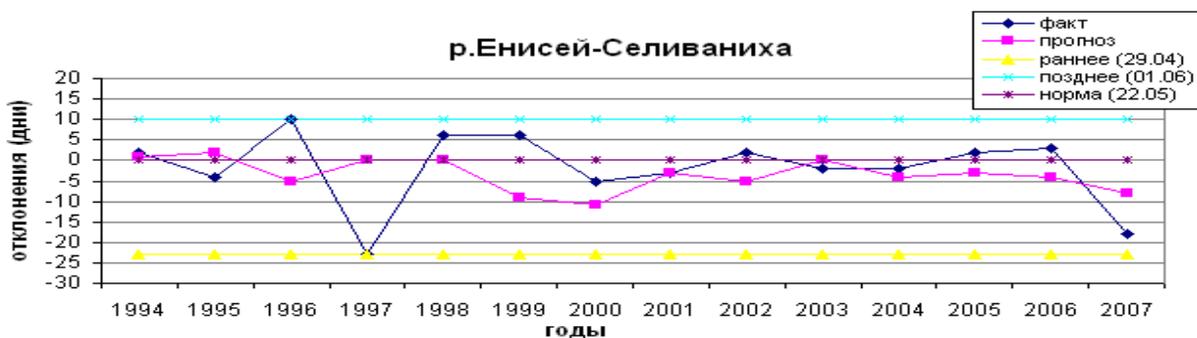
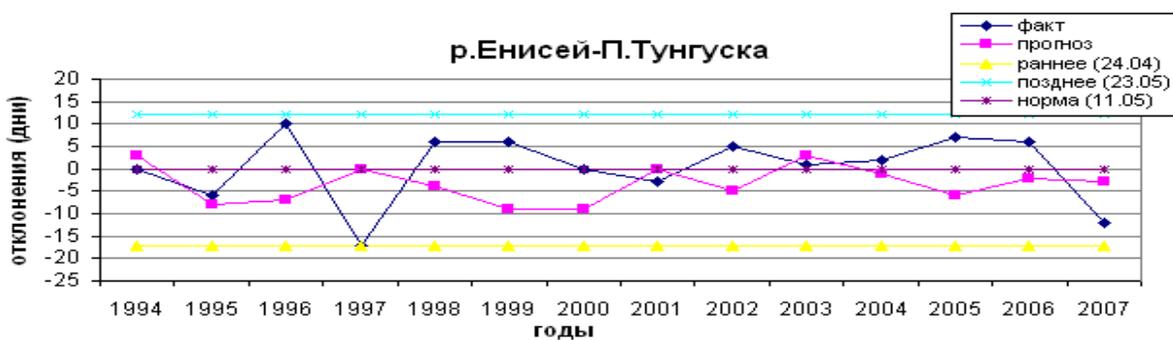
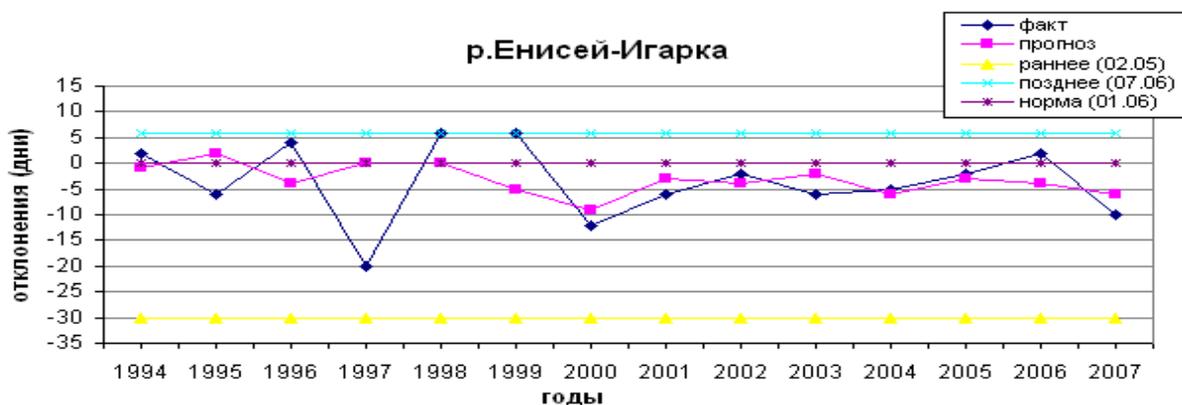
Следует также отметить, что в последнее время весенне-осенние сезоны характеризовались положительными аномалиями температуры воздуха, что, безусловно, сказалось на условиях формирования ледовых явлений. Наблюдался значительный сдвиг дат вскрытия на более ранние относительно нормы сроки, и соответственно дат ледообразования и ледостава – на более поздние. К сожалению, аномальные условия формирования ледовых явлений не всегда адекватно отражаются модельным прогнозом. Необходимо усовершенствование модели в направлении исключения из прогностических зависимостей составляющих положительного тренда, отражающего общую тенденцию к потеплению.

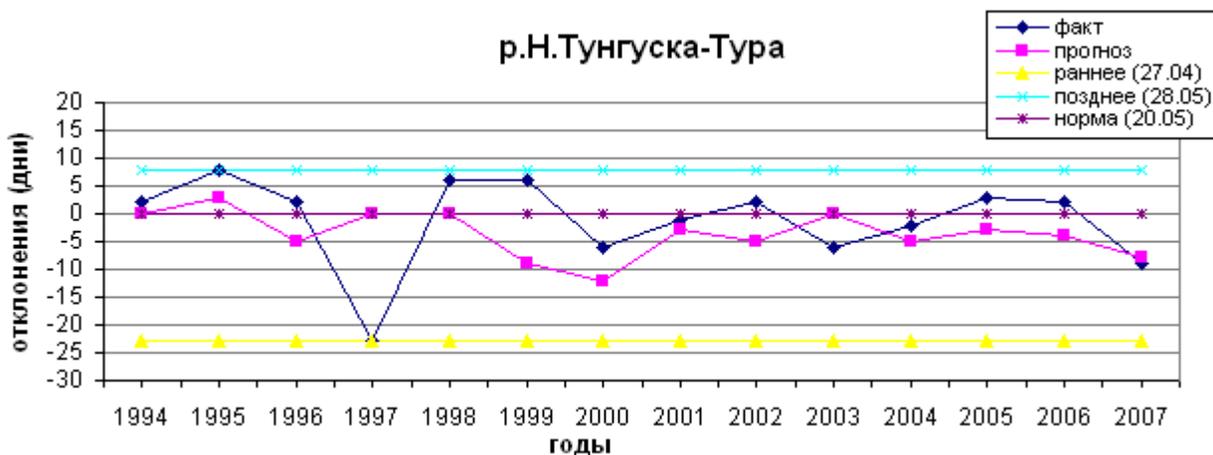
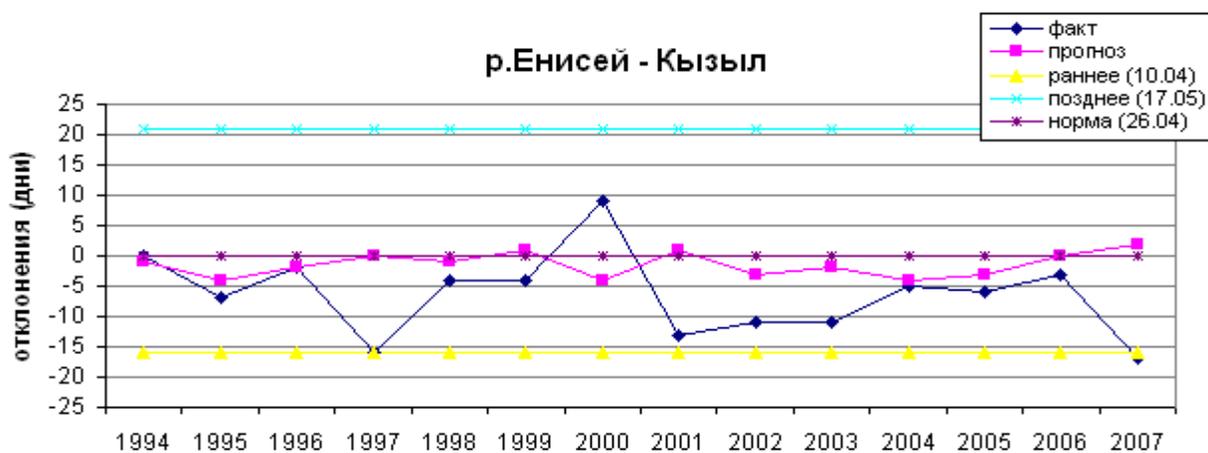
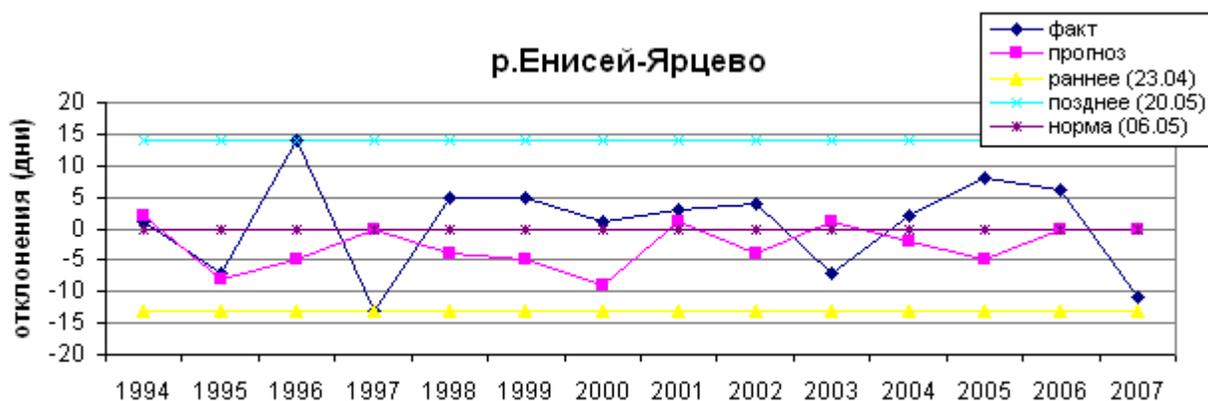
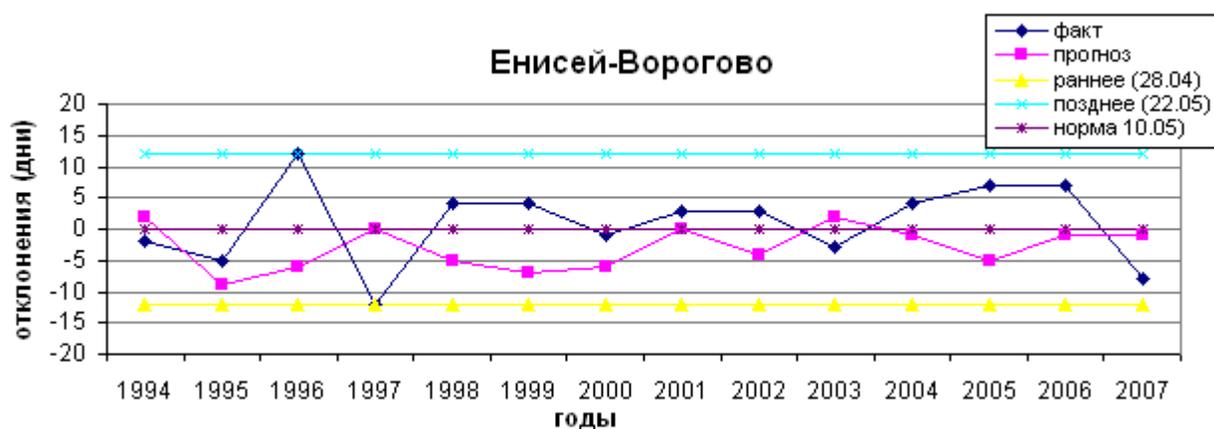
## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

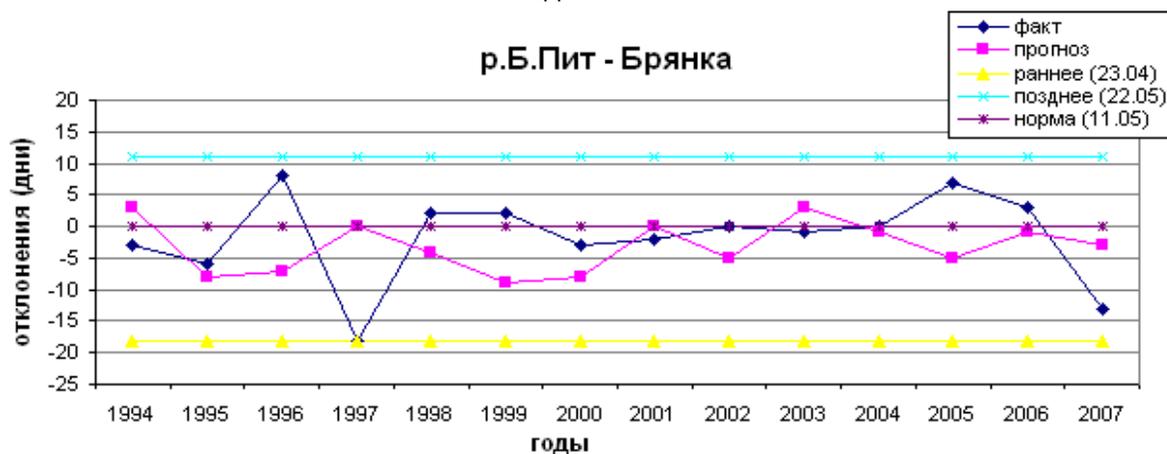
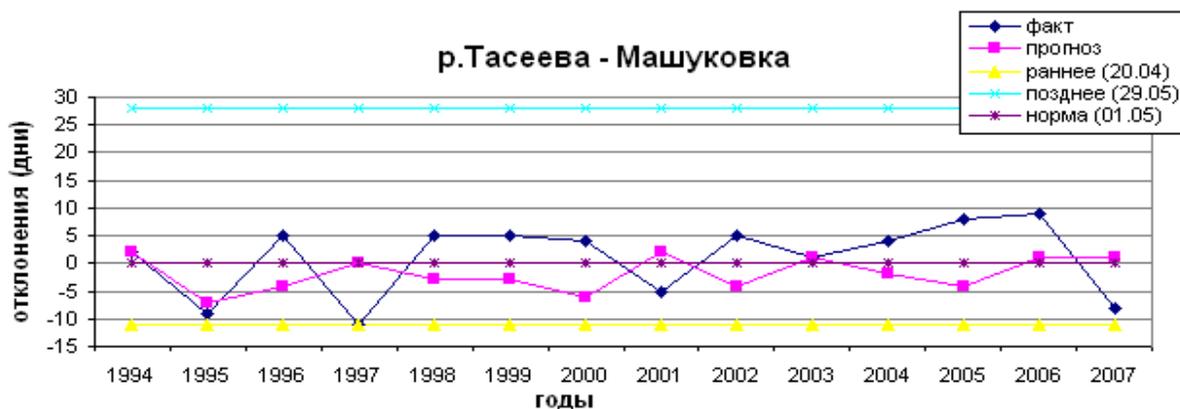
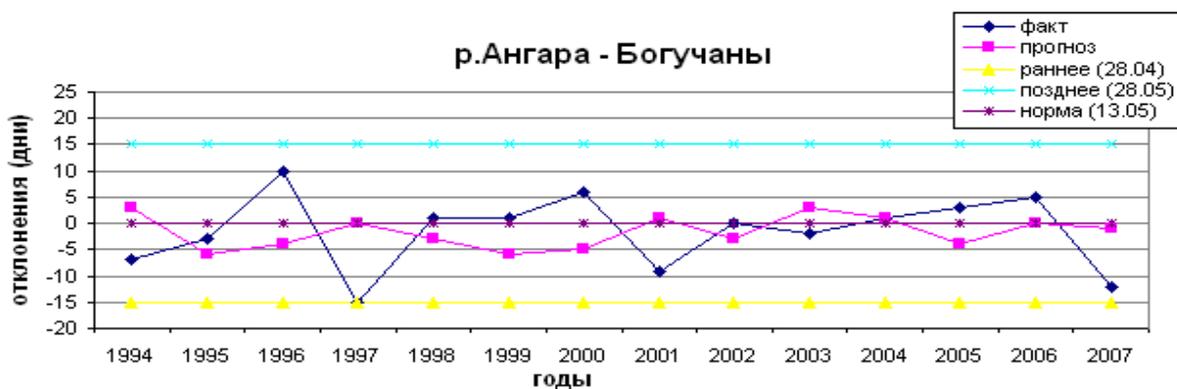
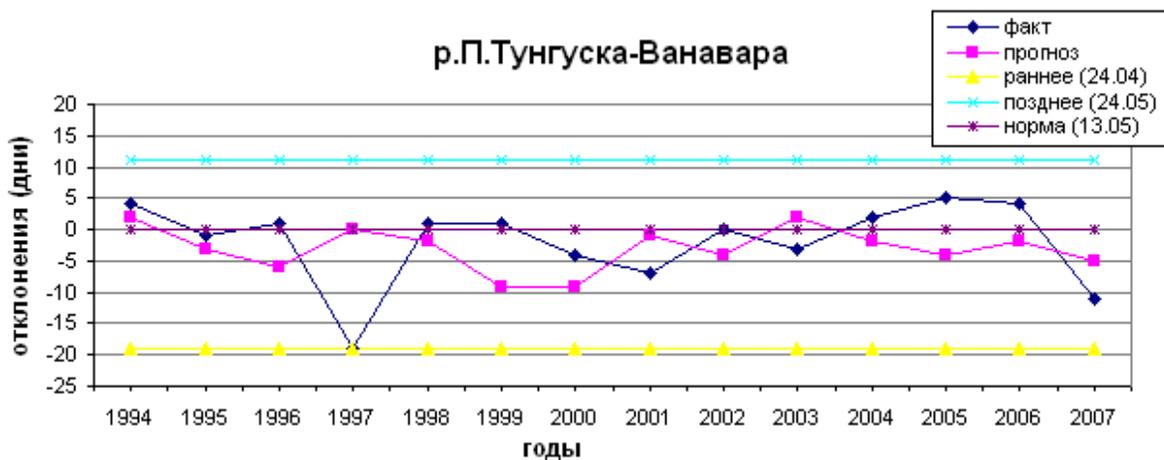
1. Руководство по гидрологическим прогнозам. Прогноз ледовых явлений на реках и водохранилищах, Вып.3. – М.: Гидрометиздат, 1989. – 168 с.
2. Гинзбург, Б.М. Вековые изменения сроков появления льда на реках и их связь с изменением климата / Б.М. Гинзбург, К.Н. Полякова, И.И. Солдатова.– М.: «Метеорология и гидрология» № 12, 1992. – С. 71–79.
3. Солдатова, И.И. Вековые изменения сроков вскрытия рек и их связь с изменениями климата / И.И. Солдатова: Журнал «Метеорология и гидрология» № 9. – М.: «Метеорология и гидрология», 1993. – С. 89–96.
4. Солдатова, И.И. О сроках ледовых явлений на реках в условиях современного климата / И.И. Солдатова: Журнал «Метеорология и гидрология», № 4. – М.: «Метеорология и гидрология», 1996. – С. 87–94.
5. Гинзбург, Б.М. Многолетние колебания сроков замерзания и вскрытия рек в различных географических зонах / Б.М. Гинзбург, И.И. Солдатова: Журнал «Метеорология и гидрология», № 6. – М.: «Метеорология и гидрология», 1996. – С. 101–108.
6. Борщ С.В. О применении моделей образования и разрушения ледяного покрова на реках при оценке влияния глобального потепления: Труды Гидрометцентра России, вып.332 / С.В. Борщ, Б.М. Гинзбург, И.И. Солдатова. – М.: Гидрометеиздат, 2000. – С. 27–37.
7. Юдин, М. И Комплексный физико-статистический метод прогноза погоды большой заблаговременности / М. И. Юдин, А. В. Мещерская: Журнал «Метеорология и гидрология» № 1, – М.: «Метеорология и гидрология», 1977. – С. 3–12.
8. Еремин, В. В. Автоматизированная система физико–статистического долгосрочного прогноза / В. В. Еремин: Труды ЗапСибНИГМИ вып. 34. – Новосибирск, ЗапСибНИГМИ, 1978.– С. 54–59.

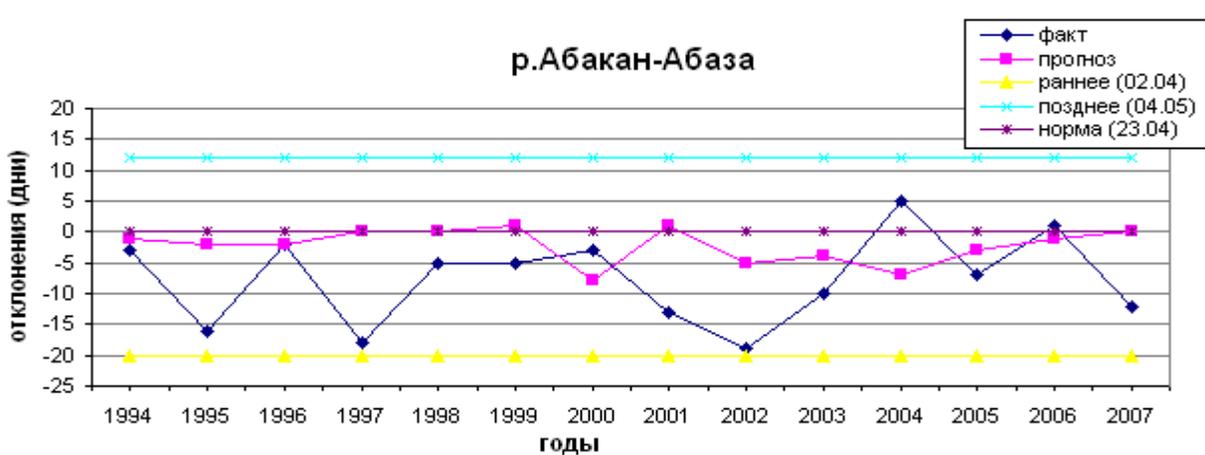
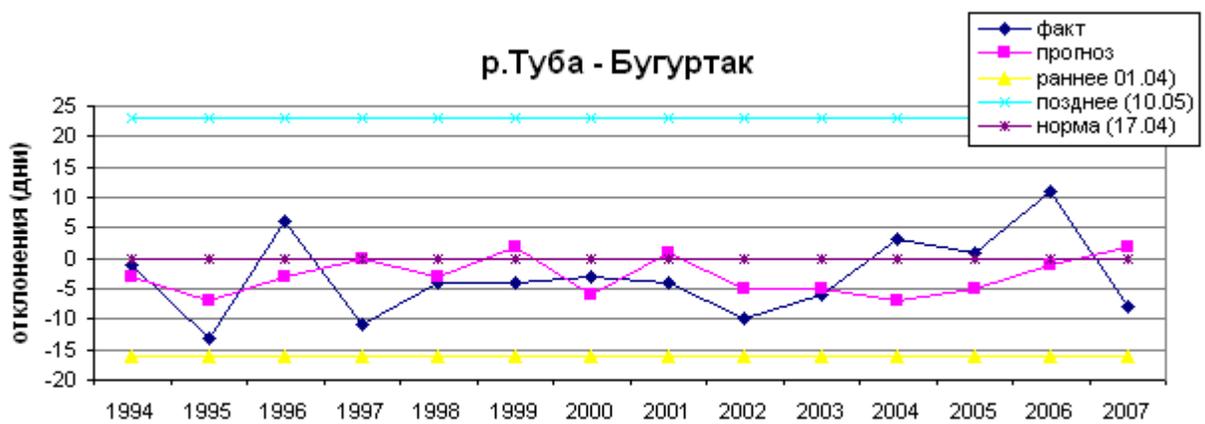
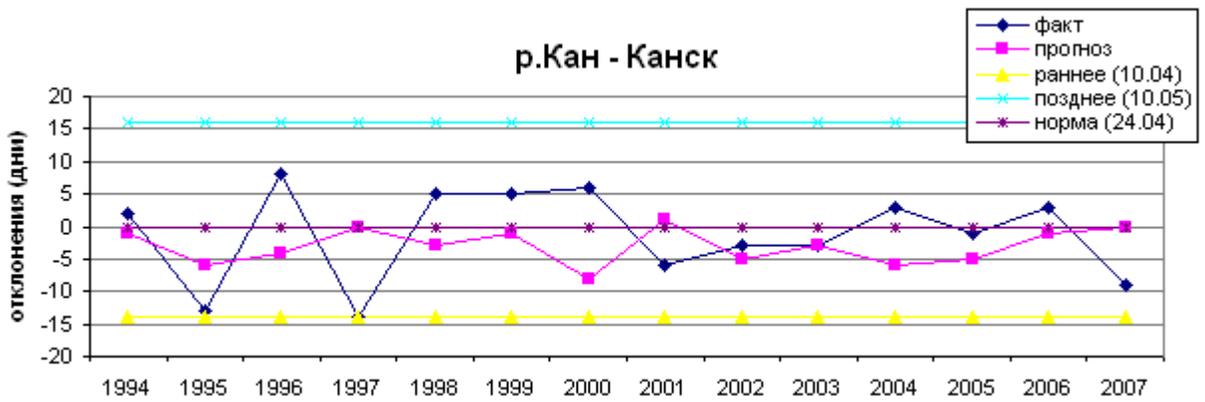
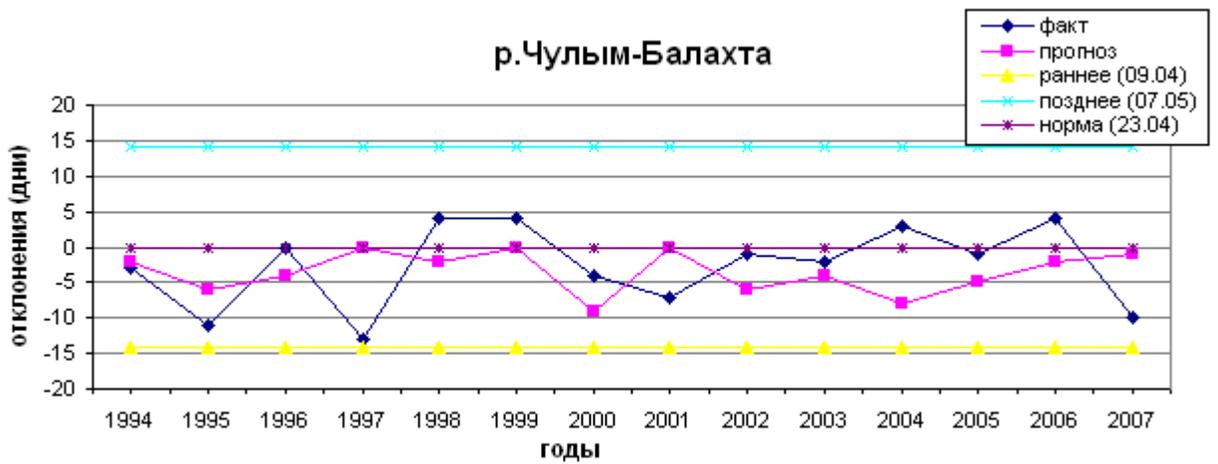
# ПРИЛОЖЕНИЕ А

## Графики дат вскрытия

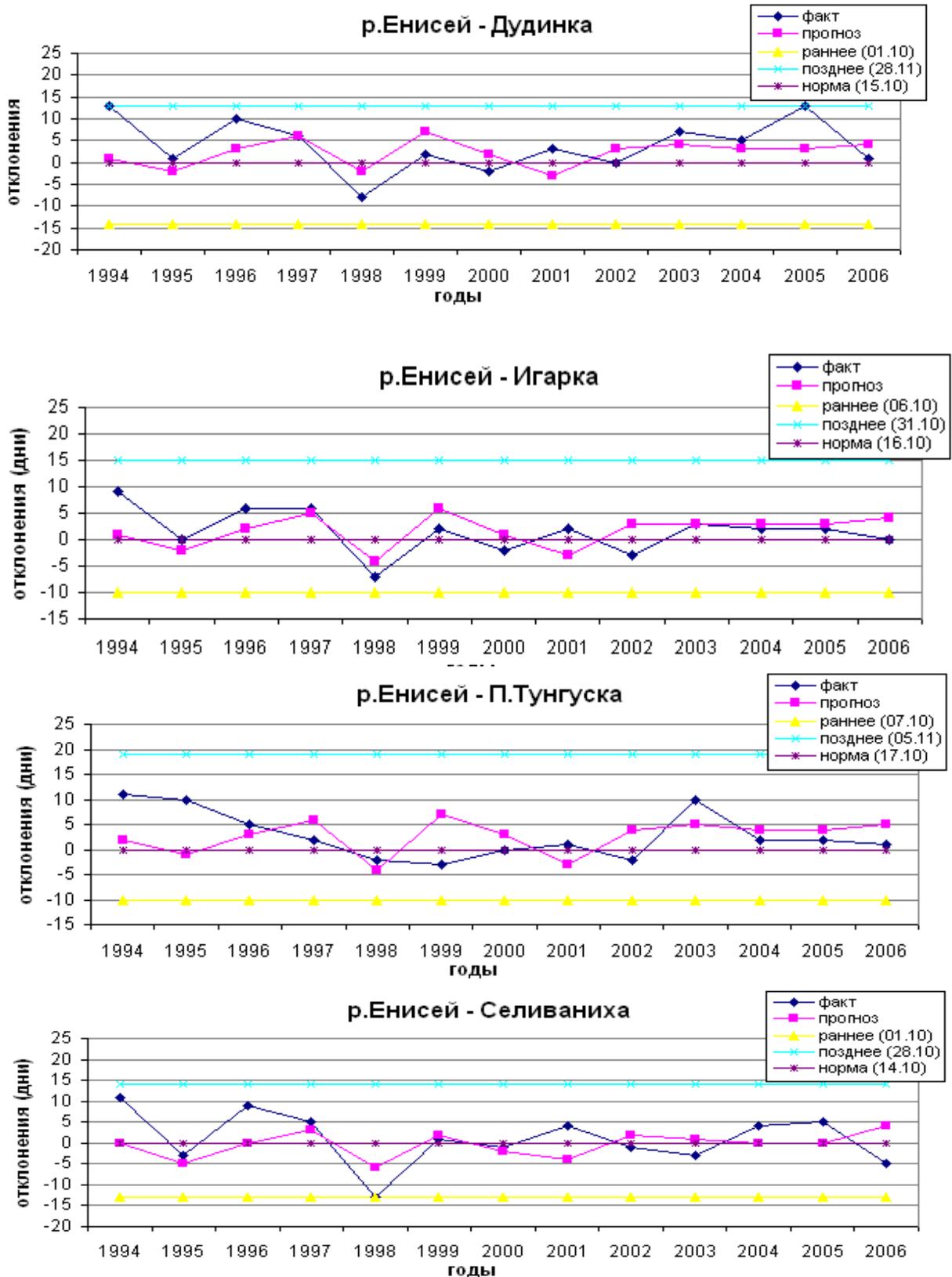


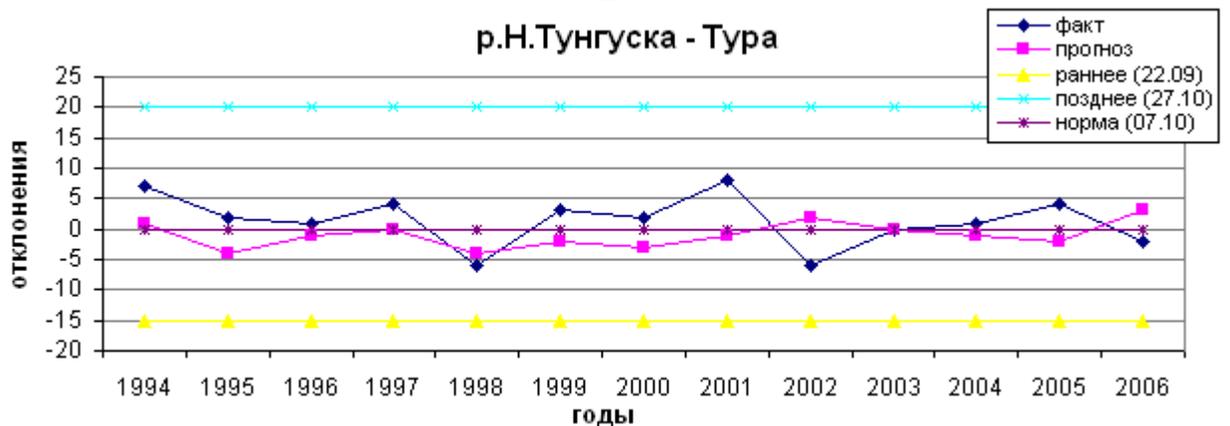
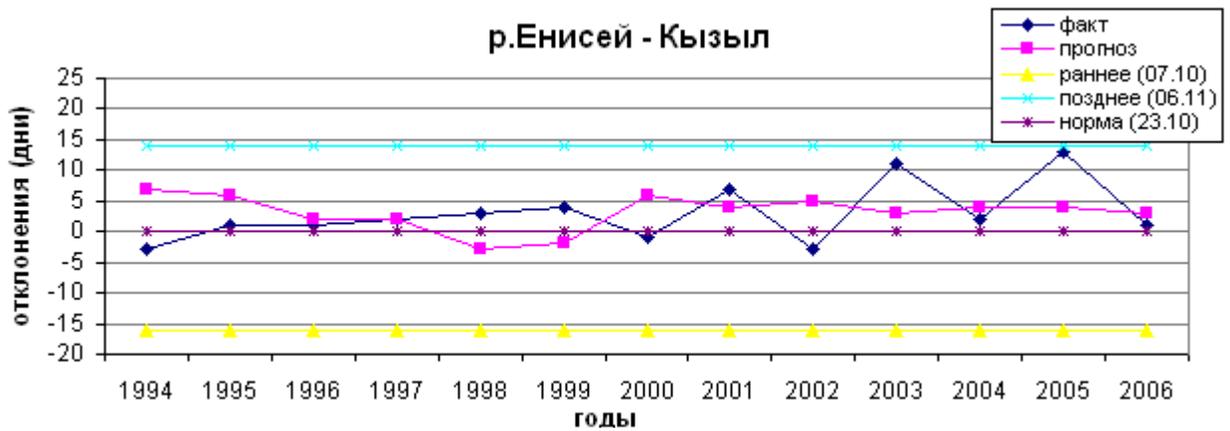
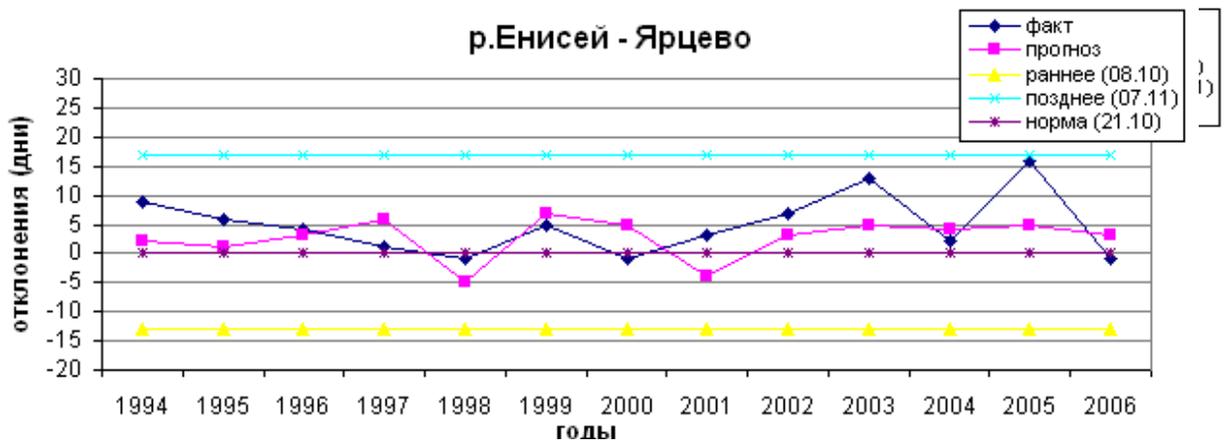
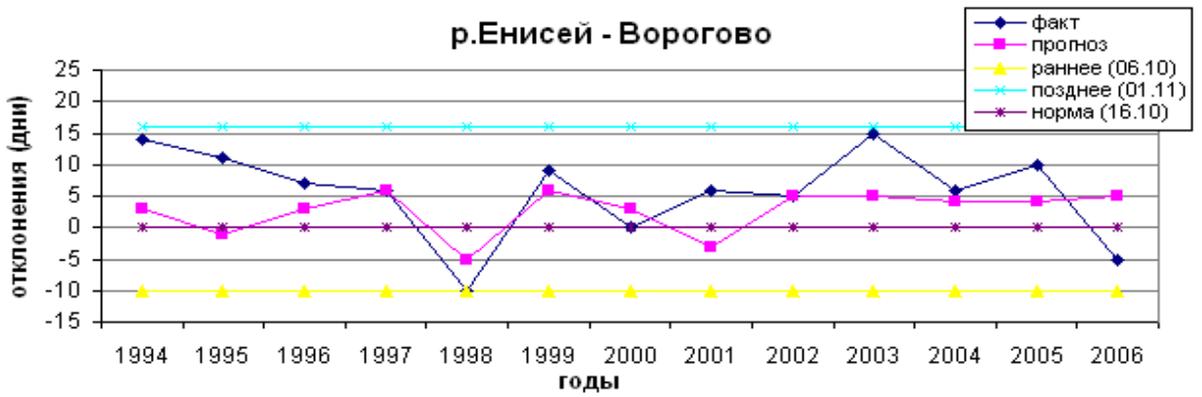


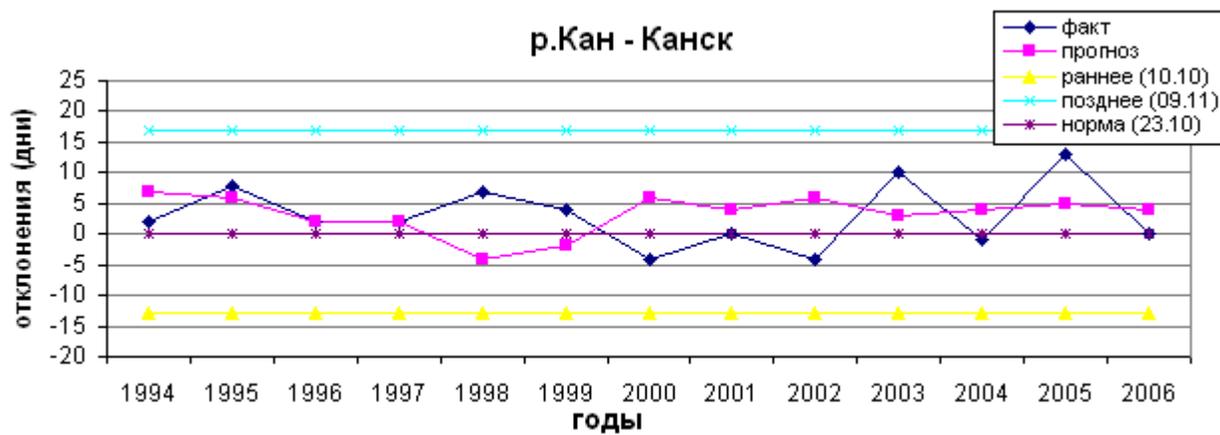
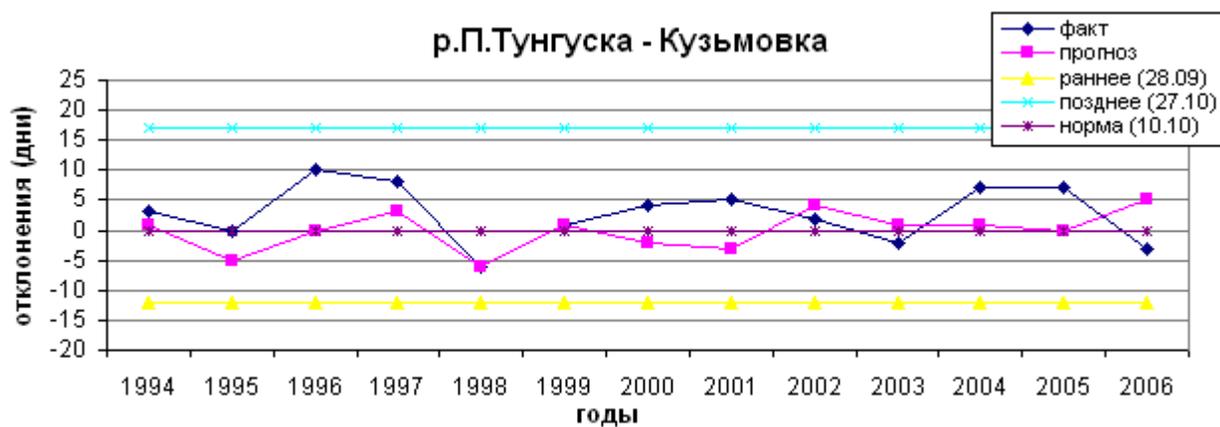




## ПРИЛОЖЕНИЕ Б Даты ледообразования







## ПРИЛОЖЕНИЕ В

Фактические, прогностические и климатические даты наступления ледостава

