

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2023-3-112-124>

УДК 556.06

Долгосрочное прогнозирование сроков вскрытия реки Юкон синоптико-статистическим методом

Ю.А. Павроз

*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр
Российской Федерации, г. Москва, Россия
sheryl@yandex.ru*

Предлагается схема получения долгосрочного прогноза сроков вскрытия ото льда североамериканской реки Юкон. В основе схемы лежит хорошо зарекомендовавший себя в отечественной практике ледовых прогнозов синоптико-статистический метод, в котором используется линейная зависимость прогнозируемой величины от характеристик полей температуры и давления в северной части Атлантического и Тихого океанов. Отобраны наиболее информативные предикторы. Проверена статистическая устойчивость параметров формулы получения прогноза. Его средняя заблаговременность составляет 40 суток. Выполненная для трех участков реки Юкон проверка предлагаемой методики на независимом материале за период с 2009 по 2015 год показала, что она позволяет получать вполне удовлетворительные результаты с достаточно низкой среднеквадратической погрешностью и достаточно высокой оправдываемостью прогнозов.

Ключевые слова: вскрытие реки, долгосрочный прогноз, синоптико-статистический метод, поля температуры и давления, предикторы, устойчивость, проверка методики

Long-range forecasting of the ice break-up dates for the Yukon River by the synoptic statistical method

Yu.A. Pavroz

*Hydrometeorological Research Center of Russian Federation,
Moscow, Russia
sheryl@yandex.ru*

A scheme for obtaining a long-range forecast of the dates of ice break-up is proposed for the Yukon River (North America). The scheme is based on a well-proven national practice of ice forecasting, namely, on the meteorological statistical method. The method utilizes a linear dependence of the predicted value on the characteristics of temperature and pressure fields in the North Atlantic and the North Pacific. The most informative predictors are selected. Statistical stability of the forecast formula parameters is verified. The average forecast lead time is 40 days. The verification of the proposed methodology performed for three stretches of the Yukon River on the basis of independent data for the period from 2009 to 2015 showed that it allows obtaining quite satisfactory results with a fairly low root-mean-square error and a fairly high accuracy of forecasts.

Keywords: river ice break-up, long-range forecast, synoptic statistical method, temperature and pressure fields, predictors, stability, method verification

Введение

Изучением влияния теплового состояния поверхности океанов и метеорологических процессов на особенности формирования и разрушения ледяного покрова рек, озер и водохранилищ в различных регионах нашей страны занимались многие отечественные ученые, из которых можно выделить Б. М. Гинзбурга [2, 3, 4], Е.И. Савченкову [7, 8], Т.Б. Подсечину [6], Н.Д. Ефремову [5], С.В. Борща [2] и других авторов. Конечной целью этих исследований была разработка методов, позволяющих прогнозировать сроки начала и продолжительности периода с различными фазами ледового режима. В результате в Гидрометцентре СССР (ныне ФГБУ «Гидрометцентр России») был предложен синоптико-статистический подход к долгосрочному прогнозированию ледовых явлений для водоемов суши [7, 8], который в дальнейшем был широко использован в практике ледовых прогнозов.

На сегодняшний день Гидрометцентр России располагает внушительным опытом в области разработки методов для долгосрочного прогнозирования ледовых явлений на реках, расположенных на территории России. В связи с этим представляется целесообразным изучить возможность применения разработанных методов для других регионов нашей планеты. Бассейн реки Юкон был выбран для исследований неслучайно. В 2008–2013 годах развивалось устойчивое сотрудничество Росгидромета и НОАА. В рамках сотрудничества с НОАА в ответ на просьбу американских специалистов был разработан современный метод для подготовки долгосрочных прогнозов сроков вскрытия ото льда реки Юкон, который успешно применялся в оперативной практике.

Краткое физико-географическое описание бассейна реки Юкон

Река Юкон – пятая по протяженности река в Северной Америке: длина составляет 3700 км и площадь водосбора – 855 тыс. км². Основная часть питания реки поступает за счет снеготаяния. Река вытекает из озера Марш и протекает по территории Канады и штата Аляска в США, впадая в залив Нортон Берингова моря.

Верхняя часть бассейна представляет собой холмистую местность и невысокие скалистые горы, тогда как нижняя часть – низкорослые равнины и низменности. Главные притоки р. Юкон – Танана, Пелли, Поркпайн, Коюкук.

Климат на большей части бассейна реки Юкон субарктический с продолжительной холодной зимой и коротким теплым летом. Годовое количество осадков невелико, при этом 50 % осадков выпадает в виде дождя в течение трех летних месяцев, а с ноября по март осадки выпадают в виде снега. Снег может выпадать круглый год в высокогорьях, где большая его часть длительное время хранится в ледниках и ледяных полях. Самый холодный месяц года – январь со средней температурой воздуха от -25 °С

на севере территории и до $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$ в южных регионах. Самый теплый месяц – июль, средняя температура воздуха в этом месяце на севере региона равна $5\text{ }^{\circ}\text{C}$, а на юге превышает $15\text{ }^{\circ}\text{C}$.

В гидрологическом режиме реки Юкон выделяется весеннее половодье в течение двух месяцев (май-июнь). Самый многоводный месяц – июнь. Маловодный период года приходится на август–апрель, минимальный объем стока реки в марте. В летний период года заметную долю в питание реки вносит таяние ледников, позволяющее обеспечивать сток реки в течение всего летнего сезона.

Ледяной покров на реке сохраняется в течение большей части года: с октября и до первой-второй декады мая. Весной в бассейне р. Юкон подъем уровня воды происходит до разрушения ледяного покрова при сплошном ледоставе за счет поступления талой воды с южной части бассейна. В результате интенсивного увеличения водности реки за счет поступления талых вод происходят подвижки льда (в среднем в начале первой декады мая) и через 3–4 дня начинается ледоход. При бурном снеготаянии в верхней (южной) части бассейна в отдельные годы вскрытие Юкона сопровождается заторами льда, которые могут привести к катастрофическим наводнениям. Наиболее мощные заторы льда на реке Юкон зафиксированы весной 2013 г., когда за одну ночь уровень воды поднялся на 5 метров, что привело к затоплению больших территорий. Катастрофических масштабов достигло наводнение 2009 г., когда при резком повышении температуры воздуха и обильном снеготаянии произошло образование ледовых заторов, сопровождавшихся повсеместным затоплением прибрежных населенных пунктов. Мощные заторы сопровождали вскрытие Юкона и весной нынешнего года. В связи с этим заблаговременный прогноз сроков начала вскрытия ото льда реки позволяет заранее подготовиться к возможному неблагоприятному развитию гидрологических процессов, в том числе и к формированию заторов льда.

Исходные гидрометеорологические данные

Долгосрочные прогнозы ледовых процессов в Гидрометцентре России составляются уже более 70 лет. Самым многообещающим является подход, основанный на физико-статистическом анализе [2–5, 7, 8]. За основу этого метода берется положение, что ледовые явления в речных бассейнах связаны с особенностями атмосферных процессов, которые в свою очередь зависят от состояния энергоактивных областей тепловой поверхности океана (ТПО).

Циркумполярный вихрь, существующий в стратосфере и тропосфере, определяет циркуляцию во всех районах Северного полушария. В работах ЕИ. Савченковой [10] предложено рассматривать поля геопотенциалов H_{500} и H_{100} на всей протяженности Северного полушария в качестве характеристики атмосферной циркуляции. Геопотенциалы (расстояние от уровня моря до поверхности с соответствующим уровнем давления) были взяты в зимние месяцы, а именно в январе и феврале. Возможность получения прогностических зависимостей определялась тем фактом, что

в выбранные периоды циркумполярный вихрь развивается до максимальных показателей и создается определенное положение барических центров. [7, 8] Количественные характеристики атмосферной циркуляции в значимых районах Северного полушария (районах, в пределах которых атмосферные процессы оказывают наибольшее влияние на формирование ледовых явлений) были получены посредством разложения метеорологических полей геопотенциалов H_{500} и H_{100} по естественным ортогональным функциям (е.о.ф), т. е. с использованием процедуры компонентного анализа. Процедура разложения позволяет получить основной объем информации по каждому полю в нескольких первых членах разложения.

В основу анализа метеорологических полей заложены данные ЕЦСПП (Европейский центр среднесрочных прогнозов погоды) из проекта ERA5 – атмосферного реанализа пятого поколения глобального климата, охватывающего период с января 1950 года по настоящее время [<https://apps.ecmwf.int/data-catalogues/era5/>]. ЕЦСПП на сегодняшний день предоставляет самую надежную, объективную и регулярно обновляющуюся метеорологическую базу данных в рамках своей оперативной деятельности по мониторингу и накоплению данных. Ежедневно обрабатываются и используются в общей сложности 40 миллионов наблюдений, подавляющее большинство из которых являются спутниковыми измерениями. ЕЦСПП также пользуется всеми имеющимися наблюдениями из неспутниковых источников, включая наземные наблюдения и авиационные отчеты. Как известно, суть реанализа заключается в том, что накопленные в архивах данные наблюдений различных платформ за период нескольких десятилетий подвергаются обработке с помощью схем четырехмерного усвоения, причем параметры схем усвоения не изменяются при обработке данных за весь период. В результате рассчитывается большое число полей, которые затем используются для исследований изменений климата различного временного масштаба, взаимодействий океан – атмосфера, исследований гидрогеологического цикла и т. д. В данной работе были использованы данные в пределах области Северного полушария, расположенной от 40° до 85° с. ш., включающие значения полей геопотенциалов на уровнях нижней стратосферы (H_{100}) и тропосферы (H_{500}) за январь, февраль и март с широтно-долготным разрешением сетки $2.5^\circ \times 2.5^\circ$.

Проведенные исследования в работах [3, 4] выявили существенное влияние пространственного распределения аномалий ТПО Северной Атлантики и северо-запада Тихого океана, а также полей геопотенциалов на формирование ледового режима рек России. Поэтому в данной работе при получении прогностических уравнений были использованы данные о ТПО, осредненные по месячным интервалам времени в так называемых энергоактивных зонах, расположенных в районах течения Куроисио, Алеутских островов, Охотского и Берингова морей на северо-западе Тихого океана и Ньюфаундлендской акватории Северной Атлантики. Были использованы данные информационного архива отдела речных гидрологических прогнозов Гидрометцентра России, содержащего сведения о среднемесечной аномалии ТПО Северного полушария в узлах пятиградусной сетки.

В Северной Атлантике были выбраны 48 точек, охватывающих ключевые, активные с точки зрения теплообмена с атмосферой зоны в гренландской, бермудской, ньюфаундлендской, канарской областях. В северо-западной части Тихого океана были взяты 50 точек, расположенных в энергетически активных зонах Охотского и Берингова морей, а также течения Куроисио (рис. 1).

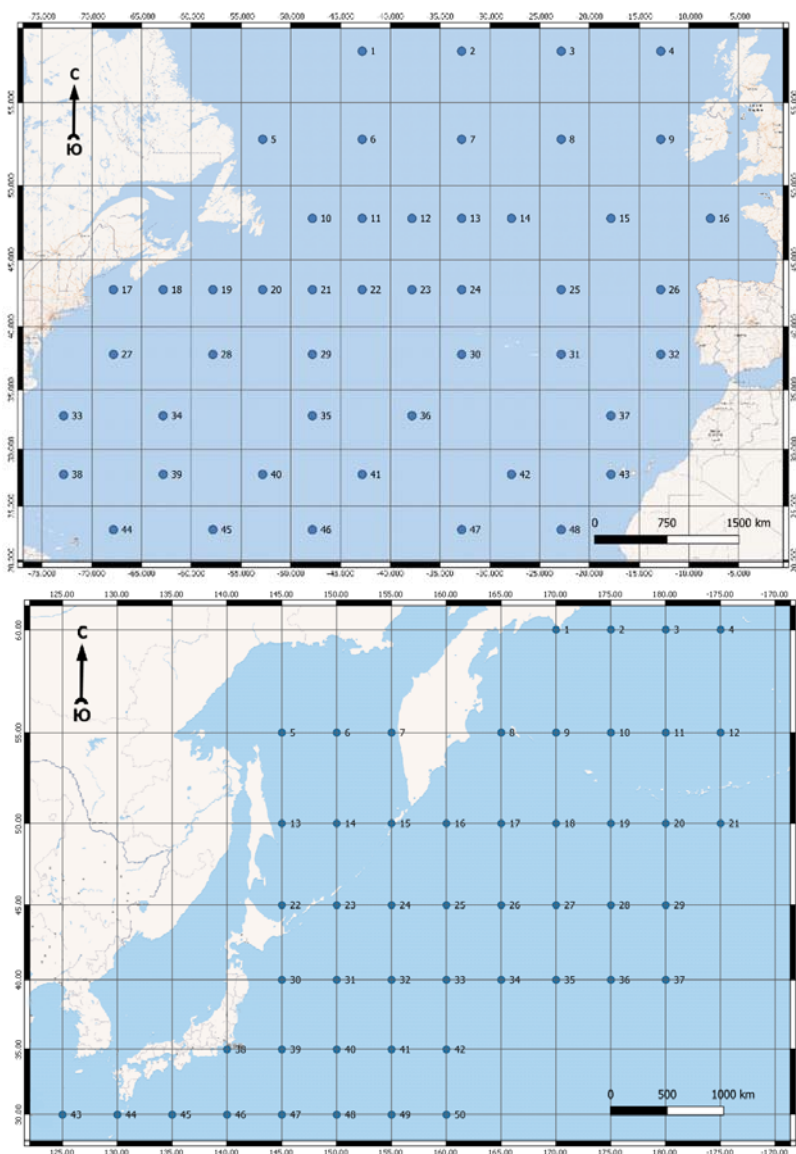


Рис. 1. Схема расположения точек в энергоактивных зонах Северной Атлантики и северо-запада Тихого океана.

Fig. 1. A diagram of the location of the points of the anomaly fields of the surface temperature of the North Atlantic and the Northwest Pacific Ocean.

Данные, характеризующие особенности атмосферной циркуляции, а также поля аномалий среднемесячных значений температуры поверхности океана в энергоактивных зонах были подвергнуты компонентному анализу с целью получения рядов коэффициентов разложения этих полей. Коэффициенты разложения (первые десять коэффициентов) полей аномалий температуры по е.о.ф. принято обозначать для Атлантики AB^{I-II}_{1-10} и, соответственно, для северо-западной части Тихого океана TB^{I-II}_{1-10} , где 1–10 – номер коэффициента разложения; I–II – номер месяца.

Сведения о сроках начала вскрытия реки Юкон выбирались из базы данных Национальной службы погоды США (NWS) (рис. 2). Как известно, надежность получаемых прогностических уравнений зависит от объема выборки: чем она больше, тем меньше вероятность получить неустойчивые прогностические зависимости. Исходя из этих соображений были выбраны семь гидрологических постов в среднем и нижнем течении реки, для которых данные наблюдений о сроках вскрытия были подвергнуты проверке гипотезы о статистической однородности рядов по критериям Стьюдента и Фишера. Суть проверки заключалась в том, что ряд разбивался на две приблизительно равные части и проверялись гипотезы о равенстве математических ожиданий и равенстве дисперсий этих двух рядов. Проверка показала, что в нашем случае гипотеза об однородности рядов не опровергается как по критерию Фишера ($F < F_{кр}$), так и по критерию Стьюдента ($t < t_{кр}$).

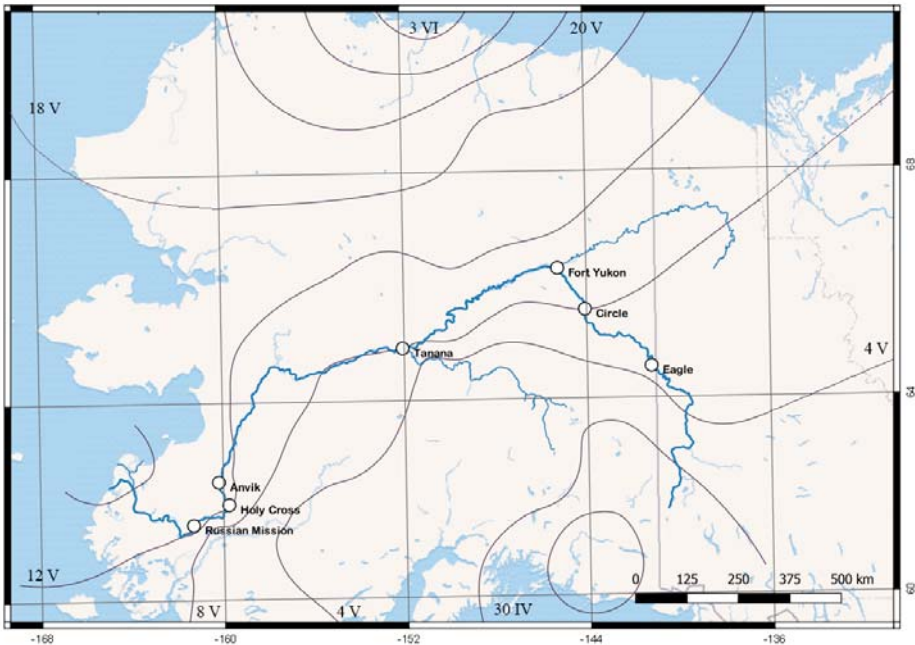


Рис. 2. Пространственное распределение среднесезонных сроков вскрытия реки Юкон за период с 1980–2021 гг. по данным NWS.

Fig. 2. Spatial allocation of average long-term periods of Yukon River breakup from 1980 to 2021 according to NWS data.

Методика долгосрочного прогноза вскрытия ото льда реки Юкон

Процесс разработки метода долгосрочного прогноза вскрытия ото льда р. Юкон может быть разделен на три этапа.

На первом этапе в полях потенциальных предикторов выявляют наиболее информативные районы, в пределах которых атмосферные процессы или ТПО оказывают наибольшее влияние на ледовый режим изучаемого водного объекта.

На втором этапе выполняется процедура компонентного анализа данных наблюдений в установленных информативных районах с целью сжатия информации и выделения наиболее информативной ее части.

На третьем этапе выполняется регрессионный анализ с целью разработки прогностических уравнений, которые могут быть использованы для прогнозирования сроков наступления ледовых явлений на изучаемых водных объектах.

Для выявления характеристик атмосферной циркуляции, которые могут быть использованы в качестве потенциальных предикторов, применялся синоптико-статистический метод, предложенный Е.И. Савченковой [7, 8]. Особенностью и преимуществом данного метода является то, что поля метеорологических элементов рассматриваются на всем пространстве Северного полушария с целью выделения информативных районов.

Для выделения в полях геопотенциалов на уровнях 500 и 100 гПа наиболее информативно значимых районов, где особенности атмосферной циркуляции оказывают наиболее сильное влияние на процессы вскрытия ото льда р. Юкон, был использован объективный метод дискриминантного анализа. Задача данного метода заключается в том, чтобы найти наибольшие отличия между группами объектов с использованием данных о разнообразии нескольких признаков, отличающих объекты друг от друга. В нашем случае анализу подвергались ряды ежегодных сроков вскрытия ото льда р. Юкон. Каждый временной ряд сроков вскрытия разбивался на три группы: 1) вскрытие произошло раньше нормы; 2) вскрытие произошло в нормальные сроки; 3) вскрытие произошло позже нормы. Близкими к норме считались сроки, когда отклонение от среднего значения не превышало наиболее вероятного значения среднеквадратического отклонения, т. е. $0,673\sigma$ (здесь σ – среднеквадратическое отклонение сроков вскрытия ото льда р. Юкон в каждом гидрологическом посту от нормальных сроков). По этим классам сгруппированы и ежегодные значения анализируемой метеорологической величины в каждом узле координатной сетки на всем Северном полушарии. Далее вычислялись 1) средние значения величин геопотенциалов в каждой точке, раньше и позже нормы, и 2) их разность $\delta = \overline{\Delta H}_n - \overline{\Delta H}_p$. Значимыми считались узлы, для которых выполнялось неравенство $d^2/\sigma^2 \geq 0,60$, а в качестве потенциально значимых полей рассматривались лишь те, которые включали в себя не менее 15 смежных

значимых узлов сетки [3]. Критическое значение 0,60 установлено путем проведения многочисленных экспериментов с разными водными объектами.

В результате дискриминантного анализа были выявлены наиболее информативно значимые районы в полях геопотенциала на высотах H_{100} и H_{500} . Для получения количественных характеристик значения H_{100} и H_{500} в каждом информативно значимом районе были разложены по е.о.ф. Первые 10 коэффициентов разложения в дальнейшем были использованы в качестве потенциальных предикторов для предвычисления сроков вскрытия.

Использование компонентного анализа, или иначе разложения полей по е.о.ф., применительно к задачам метеорологии было предложено Н.А. Багровым [1]. В результате процедуры компонентного анализа происходит разложение поля метеорологического элемента на совокупность полей наиболее часто встречающегося типа циркуляции и оценка веса этих полей в общей их совокупности [8]. Таким образом, компонентный анализ позволяет отсеять мелкомасштабные компоненты и случайные шумы, проанализировать большие объемы метеоданных, дать характеристику метеополей и сконцентрировать информацию о них в первых членах разложения. Такой подход позволяет анализировать, давать объективную оценку особенностей атмосферной циркуляции на Северном полушарии в целом, что обуславливает возможность объективно выявлять все главные особенности и характеристики атмосферных процессов в пределах изучаемых районов.

Разработка прогностических уравнений выполнялась методом пошагового регрессионного анализа, где в качестве предиктанта выступали ряды сроков вскрытия, а в качестве предикторов коэффициенты разложения метеорологических полей. Для определения влияния коэффициентов разложения на сроки разрушения ледового покрова рек был использован пошаговый регрессионный анализ, который позволил выявить наиболее информативные предикторы и построить наиболее оптимальный и устойчивый вариант прогностического уравнения. Такая процедура была применена для всех гидрологических постов на р. Юкон, включенных в данное исследование. В общем виде прогностические уравнения имеют вид:

$$\Delta D = C + C_1 B_1 + C_2 B_2 + C_3 B_3 + \dots + C_{10} B_{10},$$

где ΔD – сроки вскрытия реки ото льда, представленные в виде отклонений от средних сроков; C_1, \dots, C_{10} – коэффициенты уравнения; B_1, \dots, B_{10} – коэффициенты разложения геопотенциалов и аномалии ТПО (индексы 1, ..., 10 соответствуют номеру члена разложения).

Следует отметить, что в уравнения одновременно вошли предикторы, характеризующие как пространственное распределение ТПО, так и поля геопотенциалов. Это позволяет говорить о том, что зависимости получились комплексными, предикторы входят в уравнения практически поровну (табл. 1).

Таблица 1. Предикторы, вошедшие в прогностические уравнения, и характеристики качества уравнений для долгосрочного прогноза разрушения ледяного покрова р. Юкон

Table 1. Predictors included in forecast equations and characteristics of the quality of equations for long-term ice cover break-up forecasting Yukon River

Пункт	Зависимый ряд (расчетный)	Предикторы, вошедшие в уравнение	s/σ	Дата выпуска прогноза	Заблаговременность, дни	
					min	max
Fort Yukon	1983–2008	H ^I ₁₀₀₄ , H ^I ₅₀₀₁ , H ^{II} ₅₀₀₁ , AB ^{II} ₉ , AB ^{III} ₈	0.45	1 IV	30	53
Circle	1983–2008	H ^I ₁₀₀₅ , H ^I ₅₀₀₁ , H ^{II} ₅₀₀₁ , H ^{II} ₅₀₀₄ , H ^{II} ₁₀₀₂ , AB ^{II} ₉ , AB ^{III} ₈	0.40	1 IV	29	54
Tanana	1980–2009	H ^{II} ₅₀₀₁ , AB ^I ₅ , AB ^I ₁₀ , TB ^I ₈ , TB ^{II} ₁	0.66	1 IV	29	50
Russian Mission	1984–2009	H ^{II} ₁₀₀₁ , AB ^I ₂ , AB ^{III} ₉	0.70	1 IV	25	58

Анализируя разработанные уравнения, следует отметить, что из числа предикторов, характеризующих тепловое состояние океана, около 80 % относятся к району Северной Атлантики и лишь 20 % – поля на северо-западе Тихого океана. Таким образом, большинство предикторов относятся к району Северо-Атлантического течения, где наблюдается интенсивный теплообмен между океаном и атмосферой.

Анализ метеорологических предикторов, вошедших в прогностические уравнения, показал, что большинство из них (60 %) – это значения геопотенциала на уровне 500 гПа (тропосфера), на уровне 100 гПа (нижняя стратосфера) – 40 %.

Рассматривая географическое расположение значений геопотенциала, можно отметить, что значимые поля, которые вошли в прогностические уравнения, распределены в зонах основных центров действия атмосферы Исландского минимума, Алеутского минимума, над севером Евразии и Северным Казахстаном (рис. 3).

Поля геопотенциал H₅₀₀ за февраль имеют наибольшую прогностическую значимость, так как в 40 % случаев они включены в прогностические уравнения, а сами поля расположены в областях Исландского минимума, Алеутского минимума и севера Европы. Остальные атмосферные предикторы, вошедшие в прогностические уравнения, имеют равный вклад по 20 % и располагаются над севером Европейской территории России, Северным Казахстаном и в зоне Исландского минимума.

Прогнозы могут быть рассчитаны в начале апреля, средняя заблаговременность в этом случае составит 40 суток. Качество разработанных

уравнений оценивалось традиционно по соотношению s/σ , которое для различных гидрологических постов составило от 0,40 до 0,70, а допустимая ошибка прогнозов ± 5 дней.

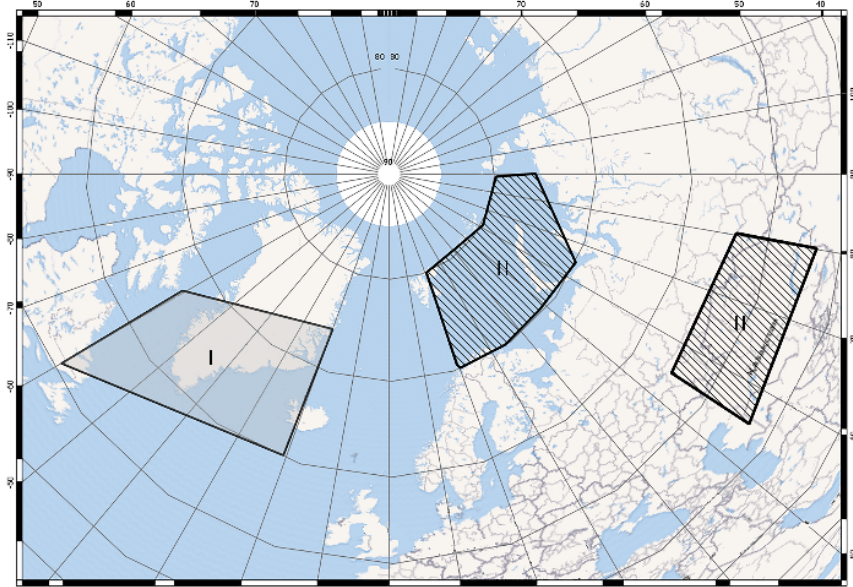
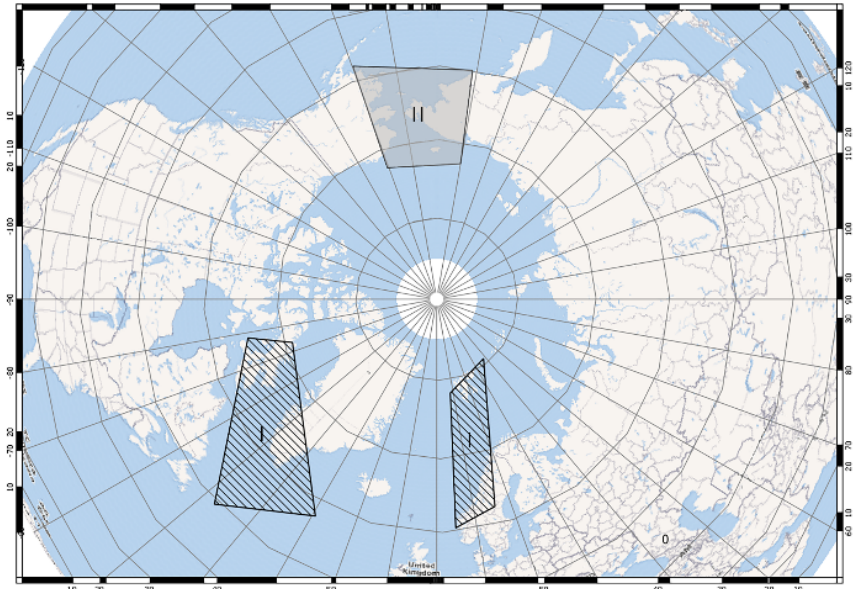
а) H_{100} б) H_{500}

Рис. 3. Схема расположения выявленных информативных значимых районов в полях H_{100} (а) и H_{500} (б) в январе (I) и феврале (II).
Fig. 3. Scheme of location of identified informative significant areas in fields H_{100} (а) and H_{500} (б).

Проверочные прогнозы, выполненные на независимых данных за 2009–2015 и 2010–2015 гг., показали практическую устойчивость прогностических уравнений, а оправдываемость проверочных прогнозов по всем пунктам в среднем составила 77 %, что говорит о их удовлетворительном качестве.

На следующем этапе исследования был составлен второй вариант прогностических уравнений, который преследовал цель получить прогностическое уравнение не для каждого гидрологического поста, а общее для участка реки. Попытка построения районных прогностических уравнений была выполнена для района, расположенного в верховьях реки, ограниченного населенными пунктами Eagle, Circle и Fort Yukon. Этот район был выбран, так как условия вскрытия ото льда р. Юкон здесь близки по генезису.

Разработка районных прогностических уравнений производилась по той же схеме, что и в первой части исследования. В итоге было разработано общее прогностическое уравнение, структура которого представлена в табл. 2. При этом для различных лет минимальная заблаговременность прогноза вскрытия на участке реки составляет от 25 до 30 суток, а максимальная – от 48 до 54 суток, при этом критерий качества метода составляет $s/\sigma = 0,42 - 0,56$. Для проверки на независимом материале был произведен расчет по данным за период с 2009 по 2015 год. Оправдываемость проверочных прогнозов за 7 лет составила в среднем 72 %, что подтверждает устойчивость уравнения и свидетельствует об удовлетворительном качестве прогнозов.

Таблица 2. Предикторы, вошедшие в прогностическое уравнение, и характеристики качества для долгосрочного прогноза вскрытия по району

Table 2. Predictors included in the predictive equation and quality characteristics for the long-term forecast of the river breakup by areas

Пункт	Зависимый ряд (расчетный)	Предикторы, вошедшие в уравнение	s/σ	Дата выпуска прогноза	Заблаговременность, дни	
					min	max
Circle	1983–2008	H ^{II} ₁₀₀₂ H ^{II} ₅₀₀₁ H ^{II} ₅₀₀₃ ТВ ^{II} ₁ ТВ ^{III} ₇ АВ ^{II} ₉ АВ ^{III} ₈	0.50	1 IV	29	54
Fort Yukon			0.42		30	53
Eagle			0.56		25	48

Сравнивая прогностические уравнения, полученные для прогнозирования по пунктам и по району, можно отметить, что наиболее значимыми предикторами оказались:

- данные об аномалиях ТПО Северной Атлантики за февраль АВ^{II}₉ и за март АВ^{III}₈, которые вошли во все уравнения;
- значения геопотенциала в тропосфере за январь H^{II}₅₀₀₁, которые вошли во все уравнения;

– значения геопотенциала в тропосфере H_{500}^{II} за февраль, которые вошли во все уравнения;

– по одному разу вошли почти во все уравнения коэффициенты разложения полей геопотенциала в нижней стратосфере H_{100} .

Таким образом из выполненного анализа можно сделать вывод о том, что такая концентрация влияния одинаковых значимых предикторов в разных прогностических уравнениях:

– подтверждает *неслучайность* и устойчивость разработанных прогностических уравнений;

– свидетельствует о том, что предложенный в Гидрометцентре России подход к долгосрочному прогнозированию сроков наступления ледовых явлений на реках применим к речным бассейнам, расположенным в различных регионах Северного полушария нашей планеты;

– подтверждает, что совместный учет особенностей атмосферной циркуляции и теплового состояния океана в его энергоактивных зонах в период, предшествующий началу разрушения ледяного покрова, дает возможность выпускать удовлетворительного качества ледовые прогнозы с достаточной для практических целей заблаговременностью (более 25 суток).

Заключение

Целью проведенных исследований было установление влияния теплового состояния океанов и особенностей атмосферной циркуляции в предвесенний период на процессы разрушения ледяного покрова на реке Юкон (США).

Выполнению исследований предшествовала разработка метода долгосрочного прогноза сроков вскрытия ото льда реки Юкон с использованием синоптико-статистического метода, разработанного в Гидрометцентре России и широко применяемого в практике оперативных ледовых прогнозов в нашей стране. В качестве потенциальных предикторов были взяты поля аномалий среднемесячных значений температуры поверхности океана в его энергоактивных зонах, поля геопотенциала на уровнях H_{100} и H_{500} в предвесенний период в значимых информативных районах. Разработка прогностических уравнений осуществлялась в двух вариантах:

1) для каждого гидрологического створа разрабатывалось свое прогностическое уравнение;

2) разработка прогностического уравнения выполнялась для средних по выбранному району ежегодных сроков вскрытия.

При разработке прогностических уравнений использовались дискриминантный, компонентный и регрессионный анализы. Анализ качества прогностических уравнений для каждого гидрологического поста и по району показал их устойчивость и удовлетворительное качество.

В ходе проведенного анализа структуры прогностических уравнений установлено существенное влияние показателей теплового состояния северо-запада Тихого океана и Северной Атлантики, а также характеристик

атмосферной циркуляции в зимние месяцы в пределах так называемых информативных районов Северного полушария, на сроки начала весенних ледовых явлений в бассейне реки Юкон.

Список литературы

1. *Багров Н.А.* Аналитическое представление последовательности метеополей посредством естественных ортогональных составляющих // Труды ЦИП. 1969. Вып. 74. С. 3-24.
2. *Борщ С.В., Гинзбург Б.М., Ефремова Н.Д.* Долгосрочный фоновый прогноз сроков вскрытия рек европейской территории СНГ // Метеорология и гидрология. 2001. № 7. С. 101-110.
3. *Гинзбург Б.М.* Влияние температуры поверхности океанов на сроки замерзания и вскрытия рек. Методы его учета в прогнозах. СПб.: Гидрометеиздат, 2005. 99 с.
4. *Гинзбург Б.М., Сильницкая М.И.* Влияние распределения температуры поверхности океанов на сроки вскрытия рек европейской территории России // Метеорология и гидрология. 2000. № 6. С. 86-91.
5. *Ефремова Н.Д., Каракаш Е.С.* Метод долгосрочного прогноза сроков вскрытия рек Лены и Енисея // Труды Гидрометцентра СССР. 1977. Вып. 186. С. 78-87.
6. *Подсечина Т.В.* Нарастание льда на волжских водохранилищах и его зависимость от атмосферных процессов // Труды Гидрометцентра СССР. 1988. Вып. 295. С. 130-137.
7. *Савченкова Е.И.* Опыт исследования связей появления плавающего льда на некоторых реках СССР с особенностями циркуляции атмосферы Северного полушария // Труды Гидрометцентра СССР. 1970. Вып. 67. С. 3-36.
8. *Савченкова Е.И.* Естественные функции полей дат появления льда на реках // Труды Гидрометцентра СССР. 1974. Вып. 117. С. 74-82.

References

1. *Bagrov N.A.* Analiticheskoe predstavlenie posledovatel'nosti meteopoley posredstvom estestvennykh ortogonal'nykh sostavlyayushchih. *Trudy CIP*, 1969, vol. 74, pp. 3-24 [in Russ.].
2. *Borshch S.V., Ginzburg B.M., Efremova N.D.* Long-Term Background Forecast of Ice Breakup Dates in European CIS Territory. *Meteorologiya i Gidrologiya [Russ. Meteorol. Hydrol.]*, 2001, no.7, pp.101-110 [in Russ.].
3. *Ginzburg B.M.* Vliyanie temperatury poverhnosti okeanov na sroki zamerzaniya i vskrytiya rek. *Metody ego ucheta v prognozakh*. Saint Petersburg: Gidrometeoizdat publ., 2005. 99 p.
4. *Ginzburg B.M., Silnitskaya M.I.* The Effect of Sea Surface Temperature Distribution on the Dates of River Breakup in European Russia. *Meteorologiya i Gidrologiya [Russ. Meteorol. Hydrol.]*, 2000, no.6, pp.86-91 [in Russ.].
5. *Efremova N.D., Karakash E.S.* Metod dolgosrochnogo prognoza srokov vskrytiya rek Leny i Eniseya. *Trudy Gidromettsentra SSSR [Proceedings of the Hydrometcentre of the USSR]* 1977, vol. 186, pp. 78-87 [in Russ.].
6. *Podsechina T.V.* Narastanie l'da na volzhskikh vodohranilishchah i ego zavisimost' ot atmosferynykh processov. *Trudy Gidromettsentra SSSR [Proceedings of the Hydrometcentre of the USSR]*, 1988, vol. 295, pp. 130-137 [in Russ.].
7. *Savchenkova E.I.* Opyt issledovaniya svyazey poyavleniya plavuchego l'da na nekotorykh rekah SSSR s osobennostyami cirkulyacii atmosfery Severnogo polushariya. *Trudy Gidromettsentra SSSR [Proceedings of the Hydrometcentre of the USSR]*, 1970, vol. 67, pp. 3-36 [in Russ.].
8. *Savchenkova E.I.* Estestvennye funkcii poley dat poyavleniya l'da na rekah. *Trudy Gidromettsentra SSSR [Proceedings of the Hydrometcentre of the USSR]*, 1974, vol. 117, pp. 74-82 [in Russ.].

*Поступила 05.07.2023; одобрена после рецензирования 20.09.2023;
принята в печать 06.10.2023.*

*Submitted 05.07.2023; approved after reviewing 20.09.2023;
accepted for publication 06.10.2023.*