УДК 556.06

МЕТОДИКА ПРОГНОЗА ДАТ ВСКРЫТИЯ ВЕРХНЕГО СУДОХОДНОГО УЧАСТКА р. КОЛЫМА В УСЛОВИЯХ НЕСТАЦИОНАРНОСТИ

М. В. Ушаков

Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт им. Н. А. Шило ДВО РАН, г. Магадан
E-mail: mvilorich@narod.ru

Впервые разработана методика среднесрочного прогноза дат начала ледохода на верхнем судоходном участке р. Колыма в условиях антропогенных и климатических изменений гидрологического режима. Спектральный анализ показал, что даты вскрытия имеют 9–10-летнюю цикличность. Предикторами для прогноза послужили даты перехода температуры воздуха через 0ºС весной и полярно-евразийский индекс атмосферной циркуляции за ноябрь с временны*м* лагом 9 лет. Лаг в 9 лет, по-видимому, связан с 9–10-летним циклом дат вскрытия. В условиях нестационарности при разработке прогностической модели использован метод скользящей регрессии. Средняя заблаговременность прогноза – полмесяца. Отношение средней квадратичной ошибки прогнозов к стандартному отклонению – 0,50, средняя оправдываемость – 84,2%. Для удобства составления прогноза разработана компьютерная программа.

***Ключевые слова*: антропогенные и климатические изменения гидрологического режима, прогностическая модель, спектральный анализ, скользящая регрессия, Колыма.**

ВВЕДЕНИЕ

Цель данной работы – разработка методики среднесрочного прогноза дат начала ледоход (вскрытия) на верхнем судоходном участке р. Колыма. Методика разрабатывается впервые.

Объект исследования – верхний судоходный участок Колымы. Река Колыма является самой большой судоходной магистралью на Северо-Востоке России. Обладая водосборной площадью в 643 тыс. км^2, полной длиной 2436 км, река ежегодно выносит в Восточно-Сибирское море 120 км^3 воды при среднем расходе около 3820 м^3/с (Lobanov, Ushakov, 2008). Длина верхнего судоходного участка составляет 915 км – от пос. Сеймчан до г. Среднеколымска. Он является наиболее сложным для речной навигации.

Для бассейна Колымы характерен суровый климат (Север…, 1970), многолетнемерзлые породы распространены повсеместно (Геокриология…, 1989), в долинах водотоков имеются сквозные гидрогенные и гидрогеогенные талики (Глотов и др., 2011). Лесной ландшафт на горных хребтах и в нагорьях сменяется тундрой, каменистыми пустынями, а местами многолетними снегами и льдами. Речная сеть в бассейне Колымы хорошо развита, особенно в верхней его части. Внутригодовое распределение стока рек бассейна отличается значительной неравномерностью, в теплую часть года (май – октябрь) протекает основная масса воды (94–99%) (Ресурсы…, 1969). В зимние месяцы на многих водотоках сток прекращается.

Предмет исследования – даты начала весеннего ледохода. Вскрытие р. Колыма на верхнем судоходном участке наблюдается обычно в III декаде, однако может происходить и в I декаде мая или в начале июня (табл. 1).

В настоящее время гидрологический режим р. Колыма претерпевает довольно заметные антропогенные и климатические изменения. Так, в работе (Ушаков, 2013) было показано, что из-за совместного влияния работы Колымской ГЭС и потепления климата осенние ледовые явления и установление ледостава стали происходить значительно позже, а вскрытие раньше (сократилась продолжительность ледостава), заметно увеличился сток в мае. К тому же в 2011 г. была возведена плотина Усть-Среднеканской ГЭС. Поэтому понятна необходимость в разработке новых методик гидрологических прогнозов в условиях нестационарности. Актуальность настоящей работы обусловлена и заинтересованностью органов МЧС, Агентства водных ресурсов, АО «Колымская судоходная компания», АО «Колымаэнерго» в прогнозах дат начала ледохода, что позволяет им планировать свою работу.

© Ушаков М. В., 2018

Таблица 1. **Среднемноголетние и экстремальные даты вскрытия р. Колыма и дат перехода температуры воздуха через 0ºС весной в пос. Сеймчан за период 1934–2016 гг.**

Table 1. **Average and extreme dates of the ice break-up on the Kolyma River and dates of transition of the air temperature through 0ºC in the spring in Seimchan River for 1934–2016**

Пункт	Даты вскрытия		
	Средняя	Самая ранняя	Самая поздняя
Сеймчан	21.V	9.V	5.VI
Балыгычан	21.V	10.V	6.VI
Коркодон	21.V	7.V	5.VI
Зырянка	22.V	10.V	5.VI
Среднеколымск	26.V	13.V	9.VI
Даты перехода температуры воздуха через 0ºС			
Сеймчан	6.V	27.IV	20.V

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для разработки методики прогноза использовались данные наблюдений на шести гидрологических постах (рис. 1, табл. 2). Многолетние ряды дат вскрытия выписаны из фонда научно-оперативных материалов по гидрологическим прогнозам Колымского управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (КУГМС). Для дальнейшей математической обработки ряды сроков начала ледохода были представлены как номер дня от 1 мая.

Ряды дат вскрытия методом регрессии были приведены к единому периоду 1934–2016 гг. По данным удлиненных рядов определяли основные расчетные характеристики дат вскрытия р. Колыма (табл. 3).

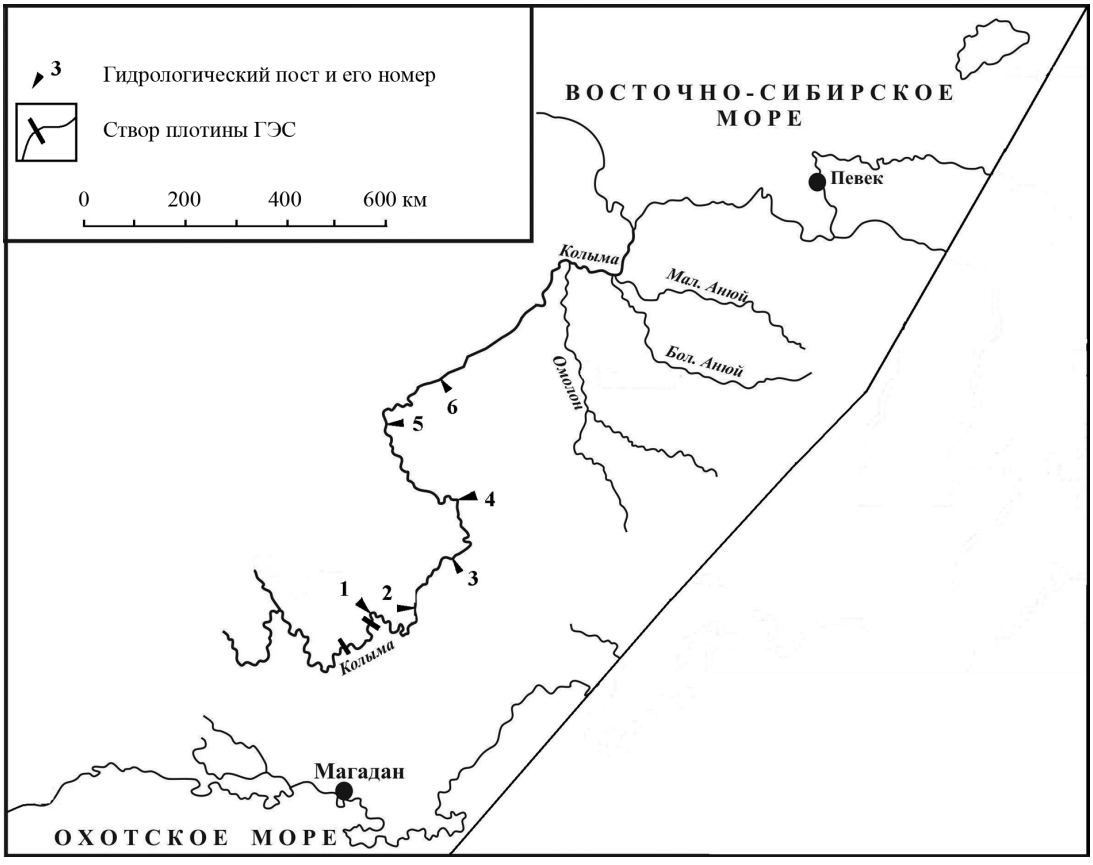

Рис. 1. Расположение гидрологических постов на р. Колыма на участке пос. Усть-Среднекан – г. Среднеколымск: 1 – пос. Усть-Среднекан, 2 – пос. Сеймчан, 3 – с. Балыгычан, 4 – гм. ст. Коркодон, 5 – пос. Зырянка, 6 – г. Среднеколымск

Fig. 1. Locations of hydrological stations on the Kolyma River between Ust-Srednekan – Srednekolymsk: 1 – Ust-Srednekan, 2 – Seimchan, 3 – Balygychan, 4 – Korkodon, 5 – Zyryanka, 6 – Srednekolymsk

Таблица 2. **Сведения о гидрологических постах на р. Колыма (Многолетние…, 1985)**
Table 2. **Information on hydrological stations on the Kolyma River (Многолетние…, 1985)**

Река – пункт	Расстояние от устья, км	Площадь водосбора, км^2	Годы с данными о датах вскрытия
пос. Усть-Среднекан	1623	99 400	1934–2014
пос. Сеймчан	1556	129 000	1956–1990, 1999–2016
с. Балыгычан	1366	140 000	1957–2016
гм. ст. Коркодон	1226	231 000	1956–1991, 1993–2016
пос. Зырянка	969	287 000	1937–2016
г. Среднеколымск	641	361 000	1927–1931, 1934–2016

Таблица 3. **Статистические характеристики дат вскрытия р. Колыма за период 1934–2016 гг.**
Table 3. **Statistical characteristics of ice break-up dates on the Kolyma River for 1934–2016**

Пункт	Среднее	C_v	σ	C_s / C_v	r (1)
Сеймчан	21.V	0,28	6,2	1,5	0,004
Балыгычан	21.V	0,28	6,2	1	0
Коркодон	21.V	0,28	6,2	1	0,006
Зырянка	22.V	0,24	5,5	1	0
Среднеколымск	26.V	0,21	5,7	0	0

Таблица 4. **Матрица коэффициентов корреляции дат начала ледохода на р. Колыма**
Table 4. **Matrix for coefficients of correlation of the ice drift beginning dates on the Kolyma River**

Пункт	Усть-Среднекан	Сеймчан	Балыгычан	Коркодон	Зырянка	Средне-колымск
Усть-Среднекан	1	0,94	0,93	0,91	0,94	0,94
Сеймчан		1	0,94	0,95	0,95	0,9
Балыгычан			1	0,96	0,94	0,87
Коркодон				1	0,96	0,93
Зырянка					1	0,95
Среднеколымск						1

Даты начала ледохода р. Колыма хорошо связаны между собой (табл. 4), а это говорит о том, что временные ряды дат вскрытия являются реализациями одного динамико-стохастического процесса.

Ряды дат вскрытия были представлены в отклонениях от среднего (аномалиях)

$$\Delta D_{i,j} = D_{i,j} - D_j, \qquad (1)$$

где $D_{i,j}$ – погодичные значения дат вскрытия в год i в пункте j; D_j – средняя дата вскрытия в пункте j.

Затем было рассчитан ряд средней динамической аномалии дат вскрытия р. Колыма по формуле (рис. 2)

$$\Delta D_i = \sum_{j=1}^{6} \Delta D_{i,j} / 6. \qquad (2)$$

После элиминации тренда спектральный анализ показал, что средняя аномалия дат вскрытия р. Колыма имеет 9–10-летнюю цикличность (рис. 3). Спектральную функцию $S(T)$ рассчитывали с использованием весовой функции Хэмминга по формуле (Шелутко, 1991):

$$S(T) = 1/2\pi + \sum_{\tau=1}^{m} \begin{bmatrix} (0{,}54 + 0{,}46\cos(\pi\tau / m)) \\ r(\tau)\cos(2\pi\tau / T) \end{bmatrix} / \pi \,, \qquad (3)$$

где τ – сдвиг по времени с дискретностью 1 год; m – максимальный сдвиг по τ ($m = n/2$ лет); $r(\tau)$ – ординаты автокорреляционной функции; T – период ($T = 1, 2, \ldots, m$ лет).

Наличие статистически значимых циклов и отсутствие связи между смежными члена-

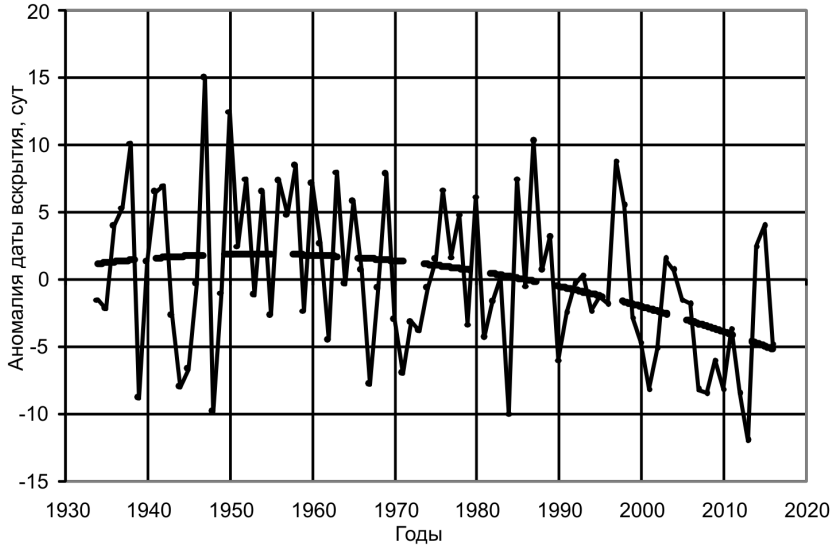

Рис. 2. Многолетние колебания средней динамической аномалии дат вскрытия р. Колыма. Пунктиром проведена линия тренда

Fig. 2. Long-term oscillations of the average dynamic anomaly of the dates of ice break-up on the Kolyma River. The trend line is dashed

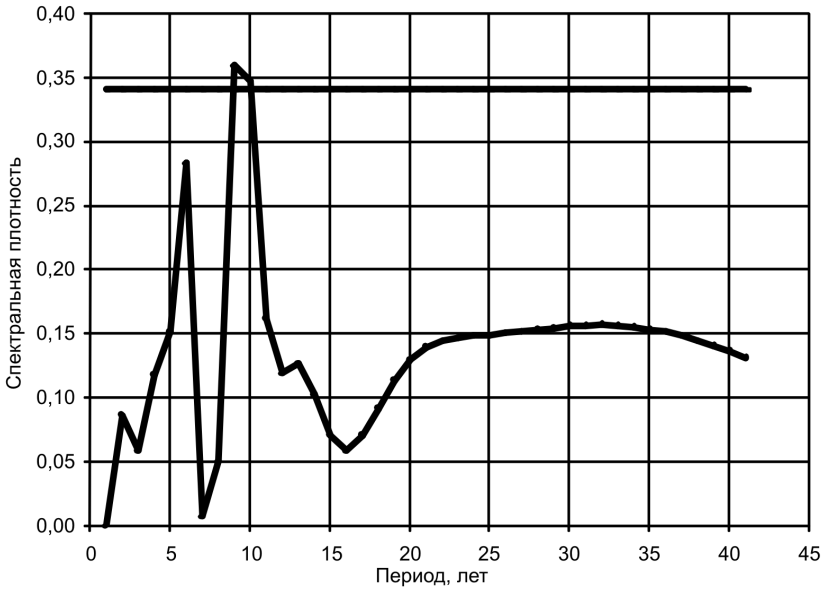

Рис. 3. Спектрограмма аномалии дат вскрытия р. Колыма (пунктиром обозначена доверительная граница при уровне значимости 5%)

Fig. 3. Spectrogram of the anomaly of ice break-up dates on the Kolyma River (the dotted line denotes a confidence limit with the significance level of 5%)

ми ряда – r (1) = 0 (см. табл. 3) свидетельствует о том, что ряды вскрытия можно рассматривать как сложный процесс Маркова (Шелутко, 1984).

Таким образом, учитывая сказанное, мы имеем дело с нестационарным динамико-стохастическим Марковским процессом, а значит, сроки начала ледохода могут иметь дальние асинхронные связи с гидрометеорологическими процессами на планете, количественными выражениями которых выступают различные индексы атмосферной циркуляции и индексы связи «океан – атмосфера».

Отыскание предикторов и построение прогностической модели выполняли при помощи регрессионного анализа с привлечением взаимных корреляционных функций.

Даты перехода температуры воздуха через 0°С весной в пункте Сеймчан определяли по многолетним массивам температуры воздуха, которые размещены на сайте Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации – Мирового центра данных (ВНИИГМИ-МЦД, 2017). При отыскании эффективных предикторов использовали ряды различных индексов атмосферной циркуляции, массивы которых доступны на сайте Центра предсказания климата США (US..., 2016).

Как уже указывалось, ряды дат вскрытия нестационарны, поэтому производить построение прогностической модели целесообразно по скользящей обучающей выборке. Суть такого подхода заключается в оценке регрессии на последовательно сдвигаемом во времени интервале постоянной длины. Такую процедуру еще называют скользящей регрессией (Лукашин, 2003). Пусть, например, у нас имеется выборка достаточно большого объема T и определена спецификация уравнения регрессии Y на X, Z, … Тогда процедура оценивания скользящей регрессии предполагает сначала оценку регрессии на выборке от наблюдения 1 до k, где $k < T$. Величину k называют окном или скользящей обучающей выборкой. Далее сдвигаем окно на одну единицу времени вперед и вновь оцениваем параметры уравнения регрессии на выборочном интервале от наблюдения 2 до $k + 1$ и т. д.

В условиях меняющегося климата Всемирная метеорологическая организация рекомендует подсчитывать климатические нормы за 30 лет.

Исходя из этого, размер скользящей обучающей выборки (окна) был назначен тоже 30 лет.

Качество прогностической модели оценивали в соответствии с (Наставление…, 1962).

ПОСТРОЕНИЕ ПРОГНОСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ И ЕЕ ВЕРИФИКАЦИЯ

Установлено, что суровость зимы (средняя температура воздуха за октябрь – апрель) и максимальные запасы воды в снежном покрове не сказываются на сроках начала ледохода на Колыме.

На процессы разрушения ледяного покрова влияет количество тепла, поступающего весной. Выявлена хорошая связь дат вскрытия р. Колыма с датами перехода температуры воздуха через 0ºС весной в пос. Сеймчан. В среднем переход температуры воздуха через 0ºС происходит 6 мая, а значит, средняя заблаговременность прогнозов будет составлять 15–20 дней (см. табл. 1).

Анализ взаимных корреляционных функций связи дат вскрытия и различных индексов атмосферной циркуляции выявил приемлемый предиктор – полярно-евразийский индекс за ноябрь с временны́м лагом 9 лет. Этот индекс связан с повышенным фоном температуры воздуха в Восточной Сибири (Barnston, Livezey, 1987). Лаг в 9 лет, по-видимому, как-то связан с 9–10-летним циклом дат вскрытия.

Механизм осуществления дальней асинхронной связи предиктанта с этим индексом не ясен. Однако это обстоятельство не должно быть препятствием для решения проблемы прогнозирования с применением обнаружен-

Таблица 5. **Параметры уравнения (4)**

Table 5. **Parameters of equation (4)**

Год	R_i	a_i	b_i	c_i
1989	0,90	1,248	0,442	-24,7
1990	0,91	1,299	0,284	-26,7
1991	0,91	1,242	0,153	-24,6
1992	0,91	1,236	0,143	-24,3
1993	0,91	1,249	0,253	-24,8
1994	0,90	1,230	0,265	-24,2
1995	0,91	1,233	0,208	-24,3
1996	0,90	1,202	0,321	-23,3
1997	0,90	1,191	0,391	-22,9
1998	0,91	1,167	0,369	-22,0
1999	0,92	1,157	0,326	-21,7
2000	0,90	1,108	0,405	-20,1
2001	0,91	1,032	0,700	-17,2
2002	0,92	1,032	0,727	-17,2
2003	0,92	1,045	0,698	-17,7
2004	0,92	1,036	0,624	-17,3
2005	0,92	1,029	0,747	-17,1
2006	0,90	0,966	0,874	-14,7
2007	0,89	0,969	0,689	-15,0
2008	0,91	1,028	1,561	-17,6
2009	0,91	1,031	1,645	-17,9
2010	0,91	1,071	1,559	-19,4
2011	0,90	1,110	1,512	-20,8
2012	0,88	1,056	1,829	-19,3
2013	0,89	1,015	1,971	-17,9
2014	0,89	1,040	1,902	-18,8
2015	0,89	1,028	1,940	-18,1
2016	0,87	1,100	1,940	-20,4

Примечание. R_i – общий коэффициент корреляции.

Таблица 6. **Качество методики прогноза дат вскрытия р. Колыма**
Table 6. **Quality of the forecasting methodology for the ice break-up dates on the Kolyma River**

Пункт	Отношение средней квадратичной ошибки прогноза к стандартному отклонению ряда (S/σ)	Оправдываемость прогнозов, %
Сеймчан	0,53	85,1
Балыгычан	0,60	71,4
Коркодон	0,47	85,7
Зырянка	0,44	92,9
Среднеколымск	0,50	85,7
Среднее по участку	0,50	84,2

ных эмпирических связей. Так, в работе (Ракипова, 1974) для частного случая отмечается, что отсутствие знаний механизмов солнечно-земных связей не может служить препятствием для решения проблемы прогнозирования погоды с их учетом эмпирическими и статистическими методами.

Для каждого пункта прогностическое уравнение скользящей регрессии при окне 30 лет будет иметь вид

$$D_{i,j} - D_j = a_i T_i + b_i P_{i-9} + c_i, \qquad (4)$$

где D_j – средняя дата вскрытия в пункте j по табл. 2; a_i, b_i, c_i – коэффициенты скользящей регрессии (ежегодно меняются); T_i и P_{i-9} – соответственно даты перехода температуры воздуха через 0ºС весной в пос. Сеймчан в год i и полярно-евразийский индекс за ноябрь в год i – 9.

Параметры скользящей регрессии в уравнении (4) приведены в табл. 5.

Проверочные прогнозы по формуле (4) показали хорошее качество прогностической модели (табл. 6).

Для удобства практического применения полученной методики разработана компьютерная программа на языке Visual Basic.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Многолетние ряды вскрытия р. Колыма имеют тренд, который обусловлен влиянием работы Колымской и Усть-Среднеканской ГЭС, а также климатическими изменениями, и имеют 9–10-летнюю цикличность. Выявлены приемлемые связи дат начала ледохода с датами перехода температуры воздуха через 0ºС весной в пос. Сеймчан и с полярно-евразийским индексом за ноябрь с временным лагом 9 лет.

Лаг в 9 лет, по-видимому, как-то связан с 9–10-летним циклом дат вскрытия.

В результате выполненной работы были получены уравнения для среднесрочного прогноза сроков начала ледохода на р. Колыма на участке пос. Сеймчан – г. Среднеколымск. Средняя заблаговременность прогноза составляет полмесяца. Отношение средней квадратичной ошибки прогнозов к стандартному отклонению – 0,50. Средняя оправдываемость, рассчитанная по всем пунктам, составила 84,2%, что согласно действующей шкале оценок Росгидромета соответствует оценке «хорошо». Для удобства составления прогноза разработана компьютерная программа.

Авторские испытания выполняли на продолжительном материале, поэтому в соответствии с (РД, 1991) производственные испытания предлагаемой методики можно не проводить.

ЛИТЕРАТУРА

ВНИИГМИ-МЦД. URL: http://meteo.ru/. – [Электрон. ресурс]. – Дата обращения 13.01.2017.

Геокриология СССР. Восточная Сибирь и Дальний Восток / под ред. Э. Д. Ершова. – М. : Недра, 1989. – 515 с.

Глотов В. Е., Глотова Л. П., Ушаков М. В. Аномальные изменения режима водного стока реки Колымы в зимнюю межень // Криосфера Земли. – 2011. – Т. 15, № 1. – С. 52–60.

Лукашин Ю. П. Адаптивные методы краткосрочного прогнозирования временных рядов. – М. : Финансы и статистика, 2003. – 416 с.

Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Т. 1. Вып. 17. Бассейн р. Колыма и рек Магаданской области. – Л. : Гидрометеоиздат, 1985. – 430 с.

Наставление по службе прогнозов. Разд. 3. Ч. 1. Служба гидрологических прогнозов. Прогнозы режима вод суши. – Л. : Гидрометеоиздат, 1962. – 193 с.

Ракипова Л. Р. Взаимодействие между верхними и нижними слоями земной атмосферы для спокойных и возмущенных периодов солнечной активности // Солнечно-атмосферные связи в теории климата и прогнозах погоды. – Л. : Гидрометеоиздат, 1974. – С. 161–167.

РД 52.27.284-91. Методические указания. Проведение производственных (оперативных) испытаний новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических и гелиогеофизических прогнозов. – М. : Госкомгидромет СССР, 1991. – 150 с.

Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 19. Северо-Восток. – Л. : Гидрометеоиздат, 1969. – 282 с.

Север Дальнего Востока / под ред. Н. А. Шило. – М. : Наука, 1970. – 487 с.

Ушаков М. В. Влияние Колымской ГЭС и климатических изменений на гидрологический режим р. Колыма // Вестник СВНЦ ДВО РАН. – 2013. – № 2. – С. 20–24.

Шелутко В. А. Статистические модели и методы исследования многолетних колебаний стока. – Л. : Гидрометеоиздат, 1984. – 160 с.

Шелутко В. А. Численные методы в гидрологии. – Л. : Гидрометеоиздат, 1991. – 239 с.

Barnston A. G., Livezey R. E. Classification, Seasonality, and Persistence of Low-Frequency Atmospheric Circulation Patterns // Monthly Weather Review. – 1987. – Vol. 115, No. 6. – P. 1083–1126.

Lobanov S. A., Ushakov M. V. The river water resources of the Magadan region and their long-term variability // Geography and Natural Resources. – 2008. – Vol. 29, No. 3. – P. 247–250.

US Climate Prediction Center URL: http://ftp.cpc.ncep.noaa.gov/. – [Electron. resource]. – Date Treatment 11/9/2016.

Поступила в редакцию 01.12.2018 г.

THE ICE-BREAK DATES FORECAST METHOD FOR THE UPPER NAVIGABLE SECTION OF THE KOLYMA RIVER UNDER INSTABILITY CONDITIONS

M. V. Ushakov

North-East Interdisciplinary Scientific Research Institute n. a. N. A. Shilo FEB RAS, Magadan

For the first time, the medium-term forecast methodology was developed to predict the ice-break dates for the upper navigable section of the Kolyma River under anthropogenic and climatic changes in the hydrological regime. Spectral analysis showed that ice-break beginning dates have a 9–10-year cycle. Predictors for the forecast were the dates of the air temperature transition through 0°C in the spring and the Polar-Eurasian index of atmospheric circulation for November with a time lag of 9 years. The 9-year lag, is apparently connected with the 9–10-year cycle of ice break-up dates. Under instability conditions, the sliding regression method was used in developing the forecast model. The average forecast advancement is half a month. The ratio of the mean square error of forecasts to the standard deviation was 0.50; the average success, 84.2%. For the convenience of making forecasts, a computer program has been developed.

***Keywords*: anthropogenic and climatic changes in the hydrological regime, prognostic model, spectral analysis, sliding regression, Kolyma.**

REFERENCES

Barnston, A. G., Livezey, R. E., 1987, Classification, Seasonality, and Persistence of Low-Frequency Atmospheric Circulation Patterns, *Monthly Weather Review*, vol. 115, no. 6, pp. 1083–1126.

Geocryology of the USSR, 1989, Editor E. D. Ershov, *East Siberia and Far East*, Moscow, Nedra, 1989 [In Russian].

Glotov, V. E., Glotova, L. P., Ushakov, M. V., 2011, Anomalous Changes of the Kolyma R. Runoff in the Winter Low-Water Season, *The Cryosphere of the Earth*, vol. 15, no. 1, pp. 52–60 [In Russian].

Lobanov, S. A., Ushakov, M. V., 2008, The River Water Resources of the Magadan Region and their Long-Term Variability, *Geography and Natural Resources*, vol. 29, no. 3, pp. 247–250.

Long-Term Data on Surface Water Regime and Resources, 1985, vol. 1, iss. 17, *The Kolyma R. Area and Other River Areas in Magadan Region*, Leningrad, Gidrometeoizdat [In Russian].

Lukashin, Yu. P., 2003, *Adaptive Methods of Short-Term Time Series Prediction*, Moscow, Finansy i Statistika [In Russian].

Rakipova, L. R., 1974, Interaction between the Upper and Lower Atmosphere Layers in Calm and Active Sun Periods, *Sun-Atmosphere Relationship under the Climate Theory and Weather Predictions*, Leningrad, Gidrometeoizdat, pp. 161–167 [In Russian].

Shelutko, V.A., 1991, *Numerical Methods in Hydrology*, Leningrad, Gidrometeoizdat [In Russian].

Shelutko, V. A., 1984, *Statistical Models and Study Methods for Long-Term Runoff Changes*, Leningrad, Gidrometeoizdat [In Russian].

Surface Water Resources in the USSR, 1969, vol. 19, North-East, Leningrad, Gidrometeoizdat [In Russian].

The Northern Areas of the Russian Far East, 1970, Editor N. F. Shilo, Moscow, Nauka [In Russian].

US Climate Prediction Center URL: http://ftp.cpc.ncep.noaa.gov/. [Electron. resource]. Date Treatment 11/9/2016.

Ushakov, M. V., 2013, The Effects of the Kolymian Hydro and Changing Climate for the Hydrological Regime of the Kolyma River, *North-East Science Center Bulletin,* no. 2, pp. 20–24 [In Russian].

VNIIGMI-MTsD. URL: http://meteo.ru/. – [Internet Resource, Access Date 13.01.2017] [In Russian].

Weather Service Manual, 1962, Ch. 3, Part 1. Hydrological Service. Prediction of Surface Water Regimes, Leningrad, Gidrometeoizdat [In Russian].

РД 52.27.284-91, 1991, *Methodological Instructions*, Current Testing of New and Improved Methods of Hydrometeorological and Heliogeophysical Forecasts, Moscow, Goskomgidromet USSR [In Russian].