

УДК 556.06

М. В. Ушаков

Прогноз сроков замерзания реки Колыма у города Среднеколымск на основе предыстории в 1950–2018 годах

ФГБУН «Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт им. Н. А. Шило Дальневосточного отделения РАН»,
г. Магадан, Российская Федерация
e-mail: mvilorich@narod.ru

Аннотация. В условиях бездорожья на Северо-Востоке России река Колыма имеет большое транспортное значение (судоходство, дороги на льду). Речной транспорт нуждается в информации о предполагаемых датах замерзания реки Колымы, чтобы адекватно планировать сроки завершения речной навигации. Автоперевозчики также нуждаются в этой информации. Цель исследования: разработать методику среднесрочного прогноза дат установления ледостава на реке Колыме. Был использован метод скользящей регрессии. Предикторами послужили даты осеннего перехода среднесуточной температуры воздуха через 0°C и индекс атмосферной циркуляции Блиновой за июнь. По ретроспективным данным оправдываемость составила 85%, отношение среднеквадратичной ошибки прогноза к стандартному отклонению прогнозируемой величины 0,68.

Ключевые слова: дата установления ледостава, климатические изменения, скользящая регрессия, предиктор, спектральный анализ, тренд.

Введение

Большое значение для народного хозяйства и безопасности населения имеют гидрологические прогнозы сроков наступления ледовых фаз на реках.

Крупнейшей речной магистралью на Северо-Востоке России является Колыма. Площадь водосбора ее составляет $647\,000\text{ км}^2$ [6]. На протяжении полутора тысяч километров она судоходна. В зимний период река используется как автодорога (зимник). Владельцы больших и маломерных судов нуждаются в информации об ожидаемых сроках замерзания Колымы, чтобы оперативно планировать сроки завершения речной навигации и снижения рисков застревания судов во льдах. Автотранспортникам, перевозящим грузы по льду, тоже нужна информация о сроках замерзания реки.

В данной работе ставится цель на основе анализа предыстории в 1950–2018 гг. разработать методику среднесрочного прогноза дат установления ледостава (замерзания) на р. Колыме у г. Среднеколымска (641 км от устья).

Долгосрочные ледовые прогнозы по г. Среднеколымску выпускает Колымское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды по методикам 60–70-х годов прошлого века. Опубликованных работ по среднесрочным прогнозам дат ледовых явлений на р. Колыме нет, за исключением [9], где предложен метод среднесрочного прогноза сроков вскрытия этой реки.

Климат территории, по которой протекает Колыма, резко континентален и суров [7], норма среднегодовой температуры воздуха на метеостанции Сеймчан за 1934–1980 гг. составляла $-11,4^{\circ}\text{C}$, а за период 1981–2016 гг. $-10,4^{\circ}\text{C}$. О том, как меняется с течением времени «норма» среднегодовой температуры воздуха можно судить по скользящей 30-летней средней (рис. 1). Экстремальные температуры воздуха в январе лежат в интервале от -56°C до -15°C , а в июле — от -2°C до $+36^{\circ}\text{C}$. Многолетняя мерзлота залегает повсеместно.



Рис. 1. Скользящая 30-летняя средняя ряда среднегодовых температур воздуха на метеостанции Сеймчан.

Составлено автором

Внутригодовое распределение стока рек бассейна Колымы отличается значительной неравномерностью, в теплую часть года (май–октябрь) протекает основная масса воды [6].

Период речной навигации весьма короток — 4–4,5 месяца. В периоды летней межени Колымский каскад ГЭС осуществляет попуски воды из водохранилищ для обеспечения судоходных уровней.

Весенний ледоход начинается во второй половине мая, начале июня. При вскрытии, как правило, формируются заторы льда, вызывающие наводнения. Появление первых ледовых явлений на р. Колыме отмечается в конце сентября, начале октября. Замерзание происходит в октябре–ноябре.

Во второй половине прошлого века начался процесс глобального потепления [4; 5], который сказывается и на гидрологическом режиме рек [12; 13; 14].

В 1988 г. на р. Колыме было введено в эксплуатацию водохранилище Колымской ГЭС, в 2011 г. возведена плотина Усть-Среднеканская ГЭС.

Из-за климатических изменений и влияния ГЭС режим Колымы претерпел серьезные изменения [8] (табл. 1):

Прогноз сроков замерзания реки Колыма у города Среднеколымск на основе предыстории в 1950–2018 годах

- увеличился осенне-зимний сток, уменьшились максимальные расходы воды весеннего половодья и дождевых паводков;
- появление осенних ледовых явлений стали происходить значительно позже, а вскрытие раньше (сократилась продолжительность ледостава), заметно увеличился сток в мае;
- существенно уменьшился сток взвешенных наносов.

Таблица 1

Среднемноголетние характеристики основных элементов гидрологического режима р. Колымы у г. Среднеколымска по [8]

Пункт	Среднее		Изменение среднего
	до 1980 г.	с 1988 г.	
Даты начала весеннего ледохода	28.V	25.V	-3*
Максимальный расход весеннего половодья, м ³ /с	16900	14900	-2000*
Слой стока за половодье, мм	106	101	-5
Продолжительность половодья, сут.	51	53	+2
Максимальный расход наибольшего в году дождевого паводка, м ³ /с	7740	7220	-520*
Слой стока за паводок, мм	27	31	+4*
Продолжительность паводка, сут.	22	25	+3*
Наивысший уровень воды, см	1156	1337	+181*
Годовой сток взвешенных наносов, тыс. т	7310	3260	-4050*

* — статистически значимая разность (по критерию Стьюдента с уровнем значимости 5%).

Составлено автором

Эти изменения серьезно осложняют задачу долгосрочного прогнозирования элементов гидрологического режима на р. Колыме.

Материалы и методы

Погодичные значения дат установления ледостава на р. Колыме взяты из Гидрологических ежегодников Государственного водного кадастра за 1950–2018 гг. При математической обработке даты были выражены, как номера дня, начиная с 1 сентября.

Среднемноголетняя дата начала ледостава приходится на 14 октября, однако согласно критерию Стьюдента при уровне значимости 5% ряд не однороден по среднему (табл. 2). Ряд асимметричен и практически не имеет автокорреляции.

Таблица 2

Статистические параметры исходного ряда дат установления ледостава на р. Колыме у г. Среднеколымска за 1950–2010 гг. и ряда, выраженного в отклонениях от линии тренда

Среднее	Коэффициент вариации	Отношение коэффициента асимметрии к коэффициенту вариации	Коэффициент автокорреляции $r(1)$	Однородность ряда по критерию	
				Стьюдента	Фишера
Исходный ряд					
44	0,11	4,5	0,05	не однороден	однороден
Ряд, выраженный в отклонениях от линии тренда					
0	0.33	1	0.01	однороден	однороден

Составлено автором

На рис. 2 видно, что в конце прошлого века в многолетних колебаниях сроков замерзания на р. Колыме имеется четко выраженная тенденция на повышение (рис. 2). А до этого ряд был стационарен. В этих условиях использование линейного тренда будет не корректно, поэтому он был описан полиномом второй степени

$$D^*_i = 0,002383i^2 - 9,3531i + 9220,0, \quad (1)$$

где i – календарный год (четыре цифры).

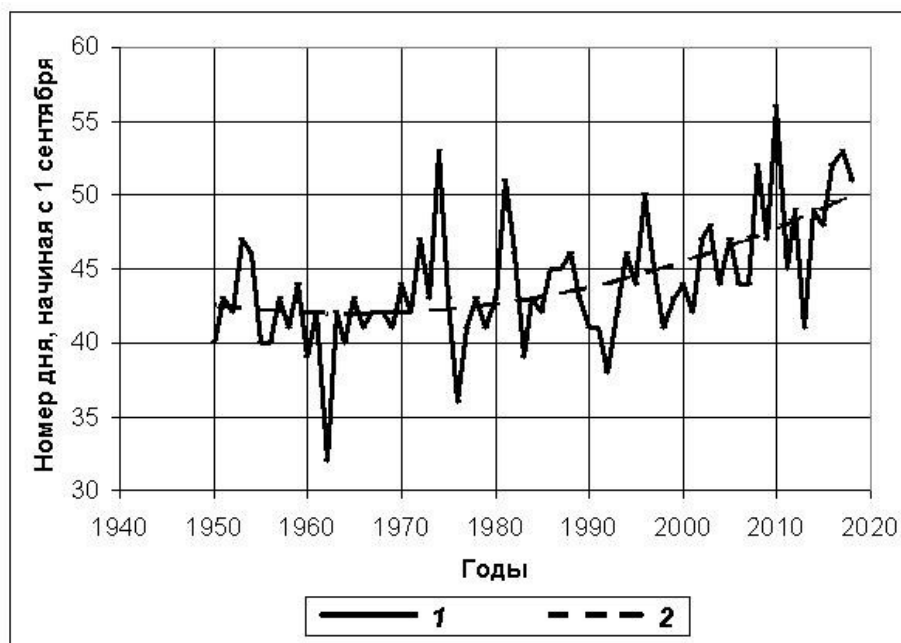


Рис. 2. Многолетний ход дат замерзания р. Колымы у г. Среднеколымска (1) и линия тренда (2).

Представим ряд дат замерзания D_i в отклонениях от линии тренда

$$\Delta D_i = D_i - D^*_i, \quad (2)$$

После элиминации тренда ряд стал однороден и мало асимметричен (см. табл. 2).

Спектральный анализ показал, что отклонения от тренда имеют статистически значимые пики на 7 и 8 лет (рис. 3). Доверительный уровень рассчитывался по критерию Тьюки [11]. Спектральная плотность рассчитывалась по следующей формуле. Спектральная функция $S(T)$ рассчитывалась с использованием весовой функции Хэмминга по формуле [11]

$$S(T) = 1/2\pi + \sum_{\tau=1}^m [(0,54 + 0,46 \cos(\pi\tau / m))r(\tau) \cos(2\pi\tau / T)] / \pi, \quad (3)$$

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

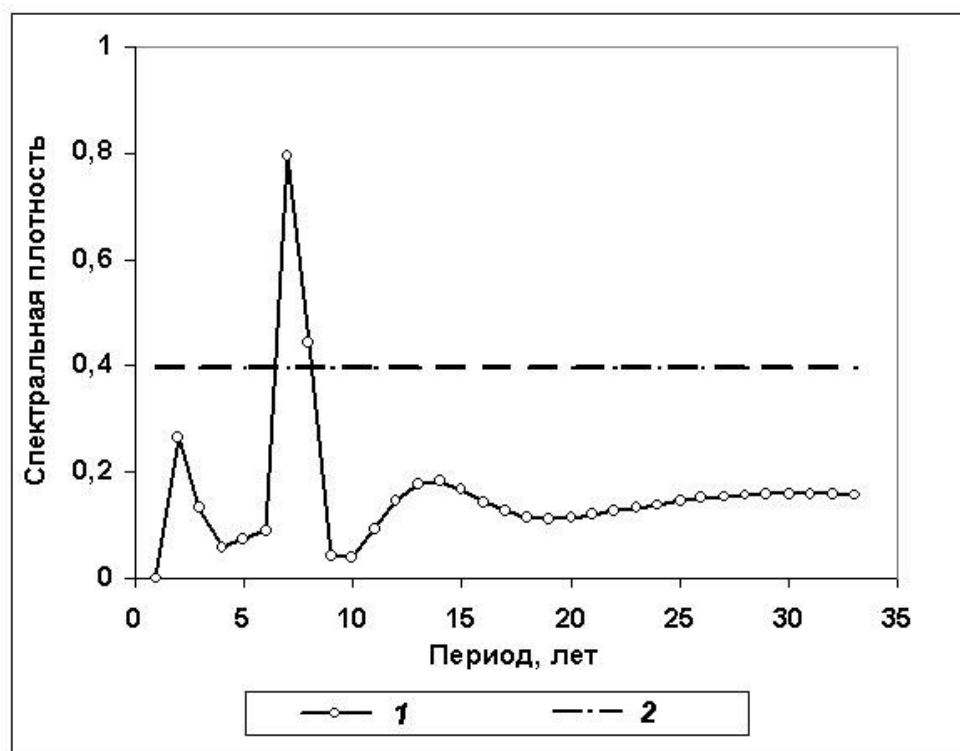


Рис. 3. Спектрограмма отклонений дат замерзания от линии тренда (1).
Доверительный уровень 5% (2)

Таким образом, можно сказать, что многолетние колебания дат установления ледостава на р. Колыме представляют из себя сложный Марковский процесс с трендом на повышение [10]. Значит, могут иметь место дальние асинхронные связи с какими-нибудь индексами атмосферной циркуляции, а их много.

При проведении регрессионного анализа был выбран предиктор: даты осеннего перехода среднесуточной температуры воздуха через 0°C на метеостанции Сеймчан. При отыскании дополнительного предиктора

использовалась компьютерная программа Mutsog», которая анализирует связи предиктанта с различными индексами атмосферной циркуляции: Арктическая осцилляция, Зональности Блиновой, Восточно-Атлантическая осцилляция, Восточно-Атлантический/Западно-Российский индекс, Восточная Пасифика–Северная Пасифика, Эль-Ниньо в районе 3.4, Северо-Атлантическая осцилляция, Эль-Ниньо в районах 1+2, 3 и 4, Южная осцилляция, Тихоокеанский/ Северо-Американский, Полярно-Евразийский, Скандинавский, Тропический Северо-Атлантический, Западно-Тихоокеанский. Наиболее эффективным предиктором оказался индекс атмосферной циркуляции Блиновой за июнь с временным лагом 9 лет. Этот индекс характеризует среднюю для Северного полушария угловую скорость зонального движения воздуха, отнесенную к угловой скорости вращения Земли [1]. Поскольку база данных индексов атмосферной циркуляции Блиновой имеется только с 1950 г., то и регрессионный анализ рядов проводился с 1950 г.

Методика прогноза и ее верификация

Поскольку ряд нестационарен, прогностическую модель предлагается строить на основе скользящей регрессии, где параметры уравнения ежегодно пересчитываются по скользящей обучающей выборке.

Суть такого подхода заключается в оценке регрессии на последовательно сдвигаемом во времени интервале постоянной длины. Пусть, например, у нас имеется выборка достаточно большого объема T и определена спецификация уравнения регрессии Y на $X, Z, \dots$. 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. [2].

Аналогичный подход был использован в работе [9] при разработке методики прогноза дат вскрытия р. Колымы.

Уравнение скользящей регрессии с окном 20 лет для прогноза отклонений дат замерзания от линии тренда выглядит следующим образом

$$\Delta D_i = a_i T_i + b_i B_{i-9} + c_i, \quad (4)$$

где i – год; a_i, b_{i-9}, c_i – параметры уравнения скользящей регрессии; T_i – дата осеннего перехода температуры воздуха через 0°C ; B_{i-9} – индекс атмосферной циркуляции Блиновой за июнь.

В настоящей работе выбор длины окна осуществлялся эмпирическим путем: на компьютере перебирались варианты скользящей регрессии при окнах 15, 20, 25, 30 лет. По оправдываемости прогнозов оптимальной длиной обучающей выборки оказалась окно 20 лет.

О том, как со временем меняются параметры регрессии можно судить по табл. 3. Судя по колебанию величин сводного коэффициента корреляции, прогностическая модель «не стареет».

Таблица 3

Параметры скользящей регрессии при длине обучающей выборки 20 лет

Год	Общий коэффициент корреляции	Параметры уравнения регрессии		
		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
1	2	3	4	5
1979	0,83	0,856	0,651	-38,2
1980	0,82	0,828	0,658	-37,7
1981	0,82	0,833	0,644	-37,4
1982	0,86	0,883	0,694	-39,8
1983	0,80	0,838	0,684	-38,4
1984	0,78	0,802	0,743	-39,5
1985	0,74	0,698	0,755	-37,4
1986	0,76	0,724	0,815	-39,9
1987	0,71	0,686	0,716	-36,0
1988	0,71	0,705	0,691	-35,8
1989	0,67	0,583	0,591	-30,3
1990	0,66	0,585	0,577	-29,9
1991	0,69	0,575	0,619	-30,8
1992	0,72	0,551	0,722	-33,2
1993	0,76	0,582	0,716	-34,0
1994	0,76	0,578	0,726	-34,3
1995	0,71	0,501	0,53	-27,3
1996	0,71	0,487	0,542	-27,4
1997	0,76	0,450	0,587	-27,5
1998	0,75	0,458	0,564	-27,0
1999	0,77	0,454	0,593	-27,8
2000	0,74	0,444	0,568	-27,0
2001	0,74	0,429	0,586	-27,3
2002	0,72	0,335	0,493	-22,7
2003	0,72	0,313	0,486	-22,0
2004	0,72	0,221	0,431	-18,4
2005	0,75	0,278	0,412	-19,3
2006	0,75	0,265	0,422	-19,2
2007	0,82	0,247	0,509	-21,5
2008	0,81	0,240	0,522	-21,7
2009	0,80	0,252	0,619	-24,4
2010	0,79	0,234	0,595	-23,4
2011	0,86	0,252	0,642	-25,1
2012	0,85	0,262	0,628	-24,9
2013	0,84	0,236	0,610	-23,7
2014	0,87	0,227	0,660	-24,9

Продолжение таблицы 3

1	2	3	4	5
2015	0,87	0,196	0,683	-24,8
2016	0,87	0,193	0,681	-24,6
2017	0,85	0,251	0,597	-23,7
2018	0,86	0,320	0,563	-24,6

Составлено автором

Учитывая (1), (2), (4), окончательное прогностическое уравнение будет иметь вид

$$D_i = 0,002383i^2 - 9,3531i + 9220,0 + a_i T_i + b_i B_{i-9} + c_i. \quad (5)$$

Заблаговременность прогноза лежит в пределах 13–28 дней.

Проверочные прогнозы за последние 20 лет (табл. 4) показали, что оправдываемость составила 85%, отношение среднеквадратичной ошибки прогноза к стандартному отклонению прогнозируемой величины $S/\sigma = 0,68$. В соответствии с [3] данная методика является удовлетворительной.

Таблица 4

**Проверочные прогнозы дат замерзания р. Колымы у г. Среднеколымска
(допустимая ошибка прогноза 3 дня)**

Год	Номер дня, начиная с 1 сентября		Ошибка	Успешность прогноза
	фактический	по прогнозу		
1999	43	46	3	оправдался
2000	44	44	0	оправдался
2001	42	41	-1	оправдался
2002	47	45	-2	оправдался
2003	48	51	3	оправдался
2004	44	43	-1	оправдался
2005	47	45	-2	оправдался
2006	44	45	1	оправдался
2007	44	45	1	оправдался
2008	52	49	-3	оправдался
2009	47	49	2	оправдался
2010	56	49	-7	не оправдался
2011	45	47	2	оправдался
2012	49	49	0	оправдался
2013	41	46	5	не оправдался
2014	49	50	1	оправдался
2015	48	47	-1	оправдался
2016	52	49	-3	оправдался
2017	53	51	-2	оправдался
2018	51	46	-5	не оправдался

Составлено автором

Среднеквадратичная ошибка прогноза вычислялась по формуле [9]

$$S = \sqrt{\sum_{i=1}^n (D'_i - D_i)^2 / (n - 6)},$$

где D'_i – дата замерзания по прогнозу; D_i – наблюдаемая дата замерзания; n – количество прогнозов; в знаменателе число 6 – количество параметров в уравнении (5).

Для удобства в работе на языке Visual Basic составлена компьютерная программа, которая ежегодно позволяет автоматически пересчитывать параметры уравнения (5) и выпускать прогноз.

Выводы

Многолетние колебания сроков установления ледостава на р. Колыме у г. Среднеколымска имеют положительный тренд и отвечают модели сложной цепи Маркова.

Для прогноза предикторами послужили даты осеннего перехода температуры воздуха через 0° С на метеостанции Сеймчан и индекс атмосферной циркуляции Блиновой с временным лагом 9 лет. Возможно, что этот лаг связан с 7–8-летней цикличностью ряда дат замерзания, выраженных в отклонениях от линии тренда.

В связи с тем, что прогнозируемый ряд является нестационарным, был использован метод скользящей регрессии.

За 1999–2018 гг. полученная методика обеспечивает оправдываемость 85%, отношение среднеквадратичной ошибки прогноза к стандартному отклонению прогнозируемой величины составляет $S/\sigma = 0,68$. Средняя заблаговременность прогноза — 20 дней.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18–05–60036 «Влияние изменений климата и глубины сезонного протаивания на водный баланс рек криолитозоны северо-востока России».

Автор выражает благодарность бывшим и ныне работающим сотрудникам Якутского УГМС и Колымского УГМС за многолетние гидрологические наблюдения на Колыме и ведение Государственного водного кадастра.

Литература

1. Блинова Е. Н. Гидродинамическая теория волн давления, температурных волн и центров действия атмосферы // Докл. АН СССР. 1943. Т. 39, № 7. С. 284–287.
2. Лукашин Ю. П. Адаптивные методы краткосрочного прогнозирования временных рядов. М.: Финансы и статистика, 2003. 416 с.
3. Наставление по службе прогнозов. Разд. 3. Ч. I. Служба гидрологических прогнозов. Прогнозы режима вод суши. Л.: Гидрометеиздат, 1962. 193 с.
4. Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации: Т. I. Изменения климата. М.: изд. Росгидромета, 2008. 227 с.

5. Пономарев В. И., Каплуненко Д. Д., Крохин В. В. Тенденции изменений климата во второй половине XX века в Северо-Восточной Азии, на Аляске и северо-западе Тихого океана // Метеорология и гидрология, 2005, № 2, С. 15–26.
6. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 19. Северо-Восток. Л.: Гидрометеиздат, 1969. 282 с.
7. Север Дальнего Востока / Под ред. Н. А. Шилов. М.: Наука, 1970. 487 с.
8. Ушаков М. В. Влияние Колымской ГЭС и климатических изменений на гидрологический режим р. Колыма // Вестник Северо-Восточного научного центра ДВО РАН. 2013. № 2. С. 20–24.
9. Ушаков М. В. Методика прогноза дат вскрытия верхнего судоходного участка р. Колыма в условиях нестационарности // Вестник Северо-Восточного научного центра ДВО РАН. 2018. № 1. С. 49–55.
10. Шелутко В. А. Статистические модели и методы исследования многолетних колебаний стока. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 160 с.
11. Шелутко В. А. Численные методы в гидрологии. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 239 с.
12. Khazheeva Z. I., Plyusnin A. M. Variations in Climatic and Hydrological Parameters in the Selenga River Basin in the Russian Federation // Russian Meteorology and Hydrology, 2016, Vol. 41, No. 9, P. 640–647, DOI: 10.3103/S1068373916090077.
13. Meleshko V. P., Kattsov V. M., Baidin A. V., Pavlova T. V., Govorkova V. A. Expected Change of Hydrologic Cycle in Northern Eurasia due to Disappearance of Multiyear Sea Ice in the Arctic Ocean // Russian Meteorology and Hydrology, 2016, Vol. 41, No. 11–12, P. 735–746, DOI: 10.3103/S1068373916110017. 13.
14. Mikhailov V. N., Mikhailova M. V. Natural and Anthropogenic Long-Term Variations of Water Runoff and Suspended Sediment Load in the Huanghe River // Water Resources, 2017, Vol. 44, No. 6, P. 793–807, DOI: 10.1134/S0097807817060057.

M. V. Ushakov

Forecast of days of freezing of the Kolyma River under conditions of climatic and anthropogenic changes

North-Eastern Complex Research Institute named after N. A. Shilov of the Far Eastern Branch of the RAS),
Magadan, Russian Federation
e-mail: mvilorich@narod.ru

Abstract. *In off-road conditions in the North-East of Russia, the Kolyma River is of great transport importance (shipping, roads on ice). River transport needs information on the expected freezing dates of the Kolyma River in order to quickly plan the timing of completion of river navigation. Trucking companies also need this information. The purpose of the study: to develop a methodology for the medium-term forecast of the dates of establishment of ice cover on the Kolyma River near the city of Srednekolymsk. The climate of the territory through which Kolyma flows is sharply continental and severe. It is known that in the second half of the last century, the process of global warming began, which affects the hydrological regime of rivers. In 1988, the Kolyma hydroelectric dam reservoir was commissioned on the Kolyma River, in 2011 the Ust-Srednekanskaya hydroelectric dam was built. Due to climatic changes and the influence of hydroelectric power plants, over the long-term fluctuations,*

obvious trends are observed, which are described by a polynomial of the second degree. A spectral analysis of a number of dates, expressed in deviations from the trend line, revealed a 7-8 year cycle. That is, long-term fluctuations freezing dates represent an unsteady complex Markov chain. Under these conditions, a sliding regression method with a training sample length of 20 years was used. For the forecast, we selected the dates of the autumnal transition of the daily average air temperature through 0°C at the Seymchan weather station and the Blinova's atmospheric circulation index for June with a time lag of 9 years. This lag is probably associated with a 7–8 year cycle of the predicted series. According to retrospective data verification forecasts showed that the accuracy was 85%, the ratio of the standard error of the forecast to the standard deviation of the predicted value of 0.68. The earliness time of the forecast lies within 13–28 days. A computer program has been compiled, which annually allows you to automatically recount the parameters of the prognostic equation.

Keywords: *ice formation date, climate change, moving regression, predictor, spectral analysis, trend*

References

1. Blinova E.N. Gidrodinamicheskaja teorija voln davlenija, temperaturnyh voln i centrov dejstvija atmosfery. Hydrodynamic theory of pressure waves, temperature waves and centers of action of the atmosphere [The hydrodynamic theory of pressure waves, temperature waves, and centers of action of the atmosphere]. Reports of the USSR Academy of Sciences. 1943. V. 39, No. 7, S. 284–287. (in Russian).
2. Lukashin Ju.P. Adaptivnye metody kratkosrochnogo prognozirovaniya vremennyh rjadov. Adaptive methods of short-term forecasting of time series [Adaptive methods for short-term time series forecasting]. Moscow: Finansy i statistika (Publ.), 2003, 416 s. (in Russian).
3. Nastavlenie po sluzhbe prognozov. Razd. 3. Ch. I. Sluzhba gidrologicheskikh prognozov. Prognozy rezhima vod sushi [Manual on the forecast service. Section 3. Part I. Hydrological Forecasting Service. Predictions of the regime of land waters]. Leningrad: Gidrometeoizdat (Publ.), 1962, 193 s. (in Russian).
4. Otsenochnyi doklad ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiyskoy Federatsii [Estimation report on climate changes and their consequences on the territory of Russian Federation. V. 1. Climate changes]. Moscow: Roshydromet, 2008, 227 s. (in Russian).
5. Ponomarev V. I., Kaplunen D. D., Krohin V. V. Tendencii izmenenij klimata vo vtoroj polovine HH veka v Severo-Vostochnoj Azii, na Aljaske i severo-zapade Tihogo okeana [Climate change trends in the second half of the 20th century in North-East Asia, Alaska and the north-west of the Pacific Ocean]. Russian Meteorology and Hydrology, 2005, 2: S. 15–26. (in Russian).
6. Resursy poverhnostnyh vod SSSR. T. 19. Severo-Vostok [Surface water resources of the USSR. V. 19. Northeast]. Leningrad: Gidrometeoizdat (Publ.), 1969, 282 s. (in Russian).
7. Sever Dal'nego Vostoka [The North of the Far East] / Ed. by N.A.Shilo. Moscow.: Nauka (Publ.), 1970, 487 s. (in Russian).
8. Ushakov M. V. Vliyanie Kolymskoj GJeS i klimaticheskikh izmenenij na gidrologicheskij rezhim r. Kolyma [The influence of the Kolyma hydroelectric

-
- station and climate change on the hydrological regime of the Kolyma River]. Bulletin of the North-East Scientific Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences. 2013. No. 2, S. 20–24. (in Russian).
9. Ushakov M. V. Metodika prognoza dat vskrytija verhnego sudohodnogo uchastka r. Kolyma v uslovijah nestacionarnosti [Methodology for predicting the dates of opening of the upper shipping section of the Kolyma River under non-stationary conditions]. Bulletin of the North-East Scientific Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences. 2018. No 1, pp. 49-55. (in Russian).
 10. Shelutko V. A. Statisticheskie modeli i metody issledovanija mnogoletnih kolebanij stoka [Statistical models and research methods for long-term flow fluctuations]. Leningrad: Gidrometeoizdat (Publ.), 1984. 160 p. (in Russian).
 11. Shelutko V. A. Chislennye metody v gidrologii. Numerical methods in hydrology [Chislennye metody v gidrologii]. Leningrad: Gidrometeoizdat (Publ.), 1991, 239 s. (in Russian).
 12. Khazheeva Z. I., Plyusnin A. M. Variations in Climatic and Hydrological Parameters in the Selenga River Basin in the Russian Federation. Russian Meteorology and Hydrology, 2016, 41(9): P. 640–647, DOI: 10.3103/S1068373916090077. (in English)
 13. Meleshko V. P., Kattsov V. M., Baidin A. V., Pavlova T. V., Govorkova V. A. Expected Change of Hydrologic Cycle in Northern Eurasia due to Disappearance of Multiyear Sea Ice in the Arctic Ocean. Russian Meteorology and Hydrology, 2016, 41(11–12): P. 735–746, DOI: 10.3103/S1068373916110017. (in English)
 14. Mikhailov V. N., Mikhailova M. V. Natural and Anthropogenic Long-Term Variations of Water Runoff and Suspended Sediment Load in the Huanghe River. Water Resources, 2017, 44 (6): P. 793–807, DOI: 10.1134/S0097807817060057. (in English)

Поступила в редакцию 12.11.2020 г.