

## ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛЕДОВОГО РЕЖИМА РЕК РЕСПУБЛИКИ САХА (ЯКУТИЯ) И ИХ КЛИМАТИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ

*В.А. Лобанов<sup>1</sup>, Н.И. Горошкова<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Российский государственный гидрометеорологический университет,  
lobanov@EL6309.spb.edu

<sup>2</sup> Государственный гидрологический институт

Проведено исследование таких основных характеристик ледового режима рек, как продолжительность периода ледостава, даты его начала и окончания, максимальная толщина льда на реках, а также характерных максимальных уровней: начала ледостава, ледохода, заторных и наибольших в году. Исследование выполнено для 11 пунктов на реках Якутии по продолжительным рядам данных наблюдений с 1950 по 2017 г. Получено, что повышение зимней температуры проявляется в уменьшении продолжительности периода ледостава в основном за счет более ранних сроков окончания ледостава. Также имеет место увеличение максимального уровня начала ледостава, а остальные характеристики ледового режима пока остаются стабильными. Исследования причин заторных наводнений для разработки методов их прогноза и оценки потенциального риска затопления хозяйственно освоенных территорий продолжают оставаться актуальными.

*Ключевые слова:* характеристики ледового режима, реки Якутии, изменение климата, оценка стационарности, изменение средних значений.

## CHARACTERISTICS OF ICE REGIME OF THE RIVERS OF THE SAKHA REPUBLIC (YAKUTIA) AND THEIR CLIMATE CHANGES

*V.A. Lobanov<sup>1</sup>, N.I. Goroshkova<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Russian State Hydrometeorological University

<sup>2</sup> State Hydrology Institute

The main characteristics of the ice regime of rivers such as the duration of the ice period, the dates of its beginning and ending, the maximum thickness of ice on the rivers, as well as the characteristics of maximum water levels such as ice-freezing, ice drift, ice congestion and the annual maximum water level are studied. The study was carried out for 11 gauged stations on the rivers of Yakutia with long-term time series from the beginning of 1950s through 2017. It has been obtained, that an increase in the winter temperature leads to a decrease in the duration of the freeze-up period, mainly due to the onset of an earlier date of the end of the freeze-up. There is also an increase in the maximum levels of freeze-up, while other characteristics of the ice regime remain stable.

*Keywords:* characteristics of the ice regime, the rivers of Yakutia, climate change, assessment of stationarity, change in mean values.

### Введение

Ледовый режим рек относится к области криосферных явлений, которые обладают инерционностью и не сразу реагируют на внешние изменения, в том числе и климатические. Поэтому интересно рассмотреть, как отражается потепление климата на таких характеристиках ледового режима рек, как максимальная

толщина льда, продолжительность периода ледостава, даты начала и окончания ледостава и характерные уровни воды периода ледостава (максимальный уровень начала ледостава, ледохода, заторов льда, максимальный за год уровень), расчетные значения которых имеют большое значение для проектирования и эксплуатации гидротехнических сооружений. Во Втором оценочном докладе Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации [4] показано, что характеристики криосферы уже откликаются на потепление климата и это проявляется в сокращении площади снежного покрова, уменьшении толщины морского льда на 23 % и сокращении доли многолетних морских льдов в Арктическом бассейне в 2—3 раза [1]. За счет повышения температуры воздуха в слое почвы до глубины 3 м начинает оттаивать вечная мерзлота, но интенсивность этого процесса меньше, чем скорость наблюдаемого повышения температуры [3].

Цель статьи состоит в анализе влияния климатических изменений на характеристики ледового режима рек Республики Саха (Якутия).

### Исходные данные

Для рассмотрения была выбрана территория центральной и южной части Якутии, где наблюдаемое повышение температуры, особенно в холодный период, наиболее значительно [6]. Схема размещения пунктов гидрологических наблюдений за характеристиками ледового режима приведена на рис. 1, а сведения о продолжительности наблюдений и координатах пунктов — в табл. 1. Как следует из

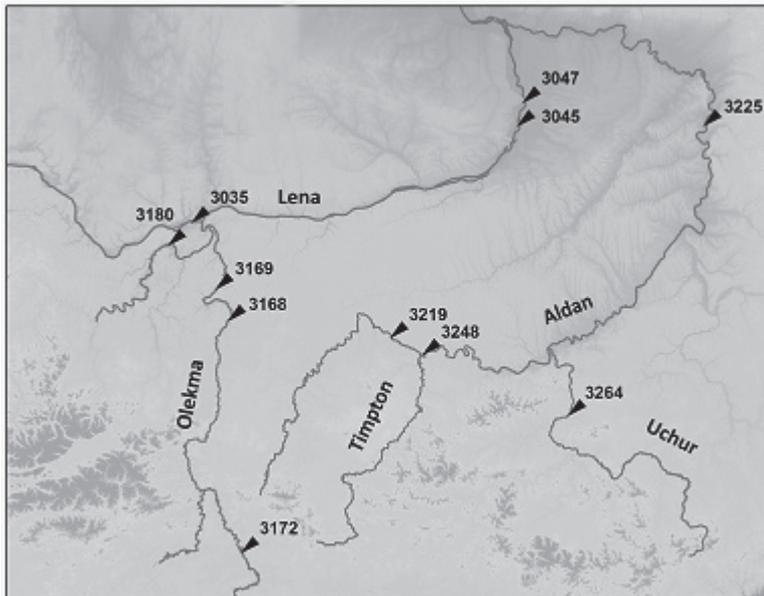


Рис. 1. Местоположение пунктов наблюдений за характеристиками ледового режима.

таблицы, продолжительность наблюдений в основном составляет 67 лет (начало в 1950 г. и окончание в 2016—2017 гг.).

Таблица 1

Характеристики пунктов и периоды наблюдений за гидрологическими характеристиками

Код поста	Река — пункт	$\varphi^{\circ}$ с.ш.	$\lambda^{\circ}$ в.д.	Период	
				Годы	Число лет
3035	Лена — Олекминск	60,4	120,4	1950—2017	68
3045	Лена — Якутск	62,0	129,8	1962—2016	55
3047	Лена — Кангалассы	62,3	130,0	1950—2016	67
3168	Олекма — Джекимдэ	59,0	121,8	1955—2016	62
3169	Олекма — Куду-Кёль	59,5	121,3	1950—2016	67
3172	Нюкжа — Лопча	55,8	122,7	1963—2016	54
3180	Чара — Токко	60,0	119,8	1950—2016	67
3219	Алдан — Томмот	59,0	126,3	1950—2016	67
3225	Алдан — Охотский Перевоз	61,9	135,5	1950—2016	67
3248	Тимптон — Усть-Тимптон	58,7	121,0	1953—2016	64
3264	Учур — Чюльбю	57,9	131,1	1954—2017	64

Помимо гидрологических характеристик, рассматривалась также и средняя температура воздуха за зимний период на метеостанции Якутск. Многолетний ряд наблюдений за зимней температурой воздуха приведен на рис. 2, из которого видно, что температура повышается, причем особенно интенсивно с конца 1980-х годов. Аналогичная закономерность повышения зимней температуры воздуха отмечается на большинстве метеостанций Республики Саха (Якутия) [8].

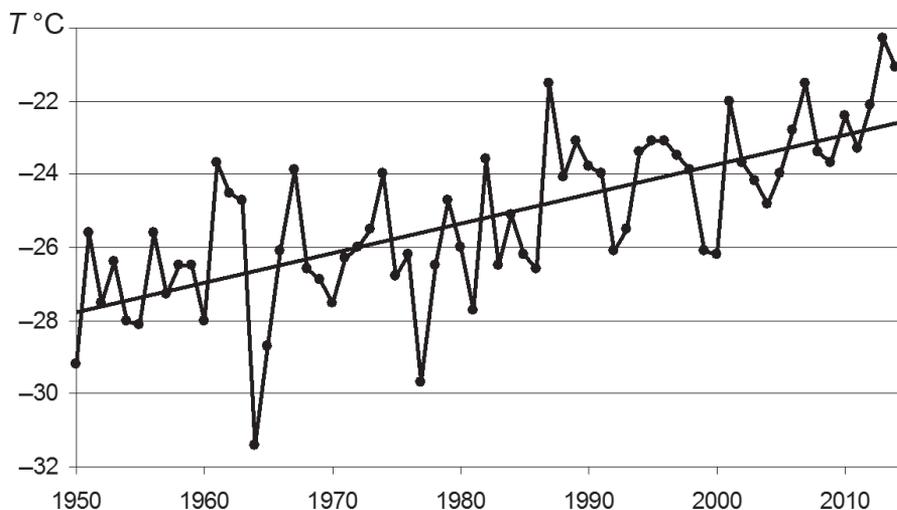


Рис. 2. Многолетний ряд температуры воздуха за зимний период на метеостанции Якутск.

### Методика исследования

Методика оценки климатических изменений основана на применении статистических критериев оценки стационарности дисперсий (критерий Фишера) и средних значений (критерий Стьюдента) для двух частей временного ряда [7, 11, 15, 16]. Кроме этого, для аппроксимации многолетних временных рядов применены два типа моделей нестационарного среднего значения: хорошо известная модель линейного тренда [15] и менее известная модель ступенчатого, или скачкообразного изменения среднего [10, 12, 13]. В последней из упомянутых моделей средние значения определяются для двух частей временного ряда, а год ступенчатого перехода от одного квазистационарного периода к другому находится итерациями при достижении минимального значения сумм квадратов отклонений двух частей временного ряда:

$$\sigma_1^2(n_1 - 1) + \sigma_2^2(n_2 - 1) = \min, \quad (1)$$

где  $\sigma_1, \sigma_2$  — средние квадратические отклонения;  $n_1, n_2$  — объемы каждой из двух частей временного ряда.

При этом в алгоритме задается минимальный объем первой части ряда, например  $n_1 = 10$ , при котором объем второй части ряда равен  $n_2 = n - n_1$ , и затем он последовательно увеличивается от  $n_1$  до  $m = n - 10$ , при котором  $n_2 = 10$ , т.е.  $n_1 = 11, 12, \dots, m$ . Данная процедура соответствует известному методу «расширяющегося окна» [9].

За показатель эффективности моделей нестационарного среднего ( $\Delta$ ) принимается относительная разность (%) средних квадратических отклонений остатков между моделью стационарного ( $\sigma_0$ ) и нестационарного ( $\sigma_{\text{нест}}$ ) среднего [13, 14]:

$$\Delta = (\sigma_0 - \sigma_{\text{нест}}) / \sigma_0 \cdot 100 \%. \quad (2)$$

Если нестационарная модель лучше, чем стационарная, то  $\Delta$  будет существенно отличаться от нуля. Также с помощью этого показателя можно оценить, какая из нестационарных моделей эффективнее, т.е. ею будет та модель, у которой  $\Delta$  больше. Статистически значимое отличие  $\sigma_0$  и  $\sigma_{\text{нест}}$  оценивается по критерию Фишера как отношение  $F = \sigma_0^2 / \sigma_{\text{нест}}^2$  [7].

### Климатические изменения характеристик ледового режима

Рассматривались такие основные характеристики ледового режима рек, как наибольшая толщина льда за период ледостава ( $L_{\text{макс}}$ ), продолжительность периода ледостава в сутках ( $T_{\text{лед}}$ ), даты начала ( $T_{\text{нач}}$ ) и окончания ( $T_{\text{кон}}$ ) ледостава в сутках от начала года. Прежде всего, оценивалась стационарность дисперсий и средних значений по известным критериям Фишера и Стьюдента соответственно [11, 16]. Для этой цели многолетние временные ряды характеристик ледового режима разбивались на две равные части и для каждой из них определялись дисперсии и средние значения, на основе которых рассчитывались статистики критериев. Эти расчетные значения статистик ( $S_p$ ) сравнивались с критическими ( $S_{кр}$ ) при заданных уровнях значимости  $\alpha$ , равных 1, 3 и 5 %.

Результаты оценки стационарности приведены в табл. 2, где знаком «+» отмечено принятие гипотезы стационарности при уровне значимости  $\alpha = 5\%$ , а знаком «-» отклонение гипотезы при  $\alpha = 1\%$ . В диапазоне  $\alpha$  от 1 до 5% гипотезу стационарности можно условно принять или отклонить. Поэтому в табл. 2 знаком «(+» обозначено условное принятие гипотезы стационарности при  $\alpha = 3\%$  ( $S_p < S_{кр}$ ), а знаком «(-)» — условное отклонение этой гипотезы при  $\alpha = 3\%$  ( $S_p > S_{кр}$ ). В случае условного принятия или отклонения гипотезы стационарности в табл. 2 приводится также и уровень значимости, соответствующий расчетному значению статистики критерия.

Как следует из табл. 2, стационарными можно считать только многолетние ряды значений наибольшей толщины льда на реках. Для рядов остальных характеристик ледового режима гипотеза стационарности средних значений отклоняется при  $\alpha = 5\%$  в четырех случаях из 11 для продолжительности ледостава, в четырех случаях для даты начала и в пяти случаях для даты окончания ледостава. Рядов, нестационарных по дисперсиям при  $\alpha = 5\%$ , всего пять, а если считать, что гипотезу стационарности можно условно принять в трех случаях из пяти, то для оставшихся двух случаев нестационарность дисперсии обусловлена влиянием отдельных аномальных экстремумов.

Таблица 2

Результаты оценки стационарности многолетних рядов характеристик ледового режима по критериям Фишера ( $\Phi$ ) и Стьюдента ( $Ст$ )

Код поста	$L_{\max}$		$T_{\text{лед}}$		$T_{\text{нач}}$		$T_{\text{кон}}$	
	$\Phi$	Ст	$\Phi$	Ст	$\Phi$	Ст	$\Phi$	Ст
3035	+	+	(+) 4,6	(-)2,4	+	(-)1,6	(+)4,4	+
3045	+	+	+	-	+	(-)2,8	+	+
3047	+	+	+	+	(-)2,1	+	+	(+)3,6
3168	+	+	+	-	+	-	+	-
3169	+	+	+	+	+	+	+	(+)3,4
3172	+	+	+	(-)2,9	+	-	+	+
3180	+	+	+	+	+	+	+	(-)2,6
3219	+	+	+	+	+	+	+	(-)2,1
3225	+	+	+	+	(-)1,7	+	+	+
3248	(+)4,3	+	+	+	+	+	+	(+)4,3
3264	+	+	+	+	+	+	+	+

В целом же оценка стационарности дисперсий и средних за два одинаковых полупериода временного ряда имеет свои ограничения, так как год разделения на две подвыборки варьировал от 1982 до 1989 г. из-за разной продолжительности рядов. Поэтому если изменения начались в конце 1980-х годов, то их нельзя было выявить, если дата полупериода относилась к началу 1980-х.

Следующий способ оценки климатических изменений основан на применении двух моделей нестационарного среднего: линейный тренд и ступенчатые изменения. Результаты оценки эффективности нестационарных моделей приведены в табл. 3 для трех характеристик ледостава:  $T_{\text{лед}}$ ,  $T_{\text{нач}}$  и  $T_{\text{кон}}$ .

Таблица 3

## Результаты оценки эффективности нестационарных моделей

Код поста	$T_{\text{лед}}$				$T_{\text{нач}}$				$T_{\text{кон}}$			
	$\Delta_{\text{тр}}$	$\Delta_{\text{ст}}$	$T_{\text{ст}}$	$R$	$\Delta_{\text{тр}}$	$\Delta_{\text{ст}}$	$T_{\text{ст}}$	$R$	$\Delta_{\text{тр}}$	$\Delta_{\text{ст}}$	$T_{\text{ст}}$	$R$
3035	<b>14,5</b>	<b>18,6</b>	1997	<b>-0,52</b>	4,7	6,2	2005	0,17	<b>10,5</b>	<b>14,1</b>	1997	<b>-0,45</b>
3045	7,8	<b>12,3</b>	1989	<b>-0,39</b>	1,5	7,6	1987	-0,01	7,7	<b>11,3</b>	2005	<b>-0,38</b>
3047	4,6	9,2	2005	<b>-0,3</b>	0	1,6	1977	<b>0,32</b>	<b>13,1</b>	<b>14,9</b>	2005	<b>-0,49</b>
3168	<b>16,9</b>	<b>21,8</b>	1988	<b>-0,56</b>	5,1	<b>10,6</b>	1991	0	<b>12,4</b>	<b>11,8</b>	1988	<b>-0,48</b>
3169	3,8	5,5	1989	<b>-0,27</b>	0	1,5	1977	<b>0,27</b>	<b>13</b>	<b>15,1</b>	2005	<b>-0,49</b>
3172	5,9	8,4	1988	<b>-0,34</b>	3,8	8,5	1989	-0,02	2,8	4,2	2006	<b>-0,24</b>
3180	4,9	7,2	1989	<b>-0,31</b>	0	2,7	1969	<b>0,24</b>	<b>13,8</b>	<b>14,7</b>	1997	<b>-0,51</b>
3219	8,2	<b>12,8</b>	1990	<b>-0,4</b>	3	9,1	2003	<b>0,31</b>	8,5	8,4	2005	<b>-0,4</b>
3225	<b>10,7</b>	<b>14</b>	1996	<b>-0,45</b>	4,9	<b>12</b>	1995	0,13	7,5	9,4	1966	<b>-0,38</b>
3248	3,5	5,3	2006	<b>-0,26</b>	0,8	5,9	2006	0	3,6	6,8	1966	<b>-0,27</b>
3264	5,3	<b>13,9</b>	1998	<b>-0,32</b>	0	7,5	1974	0,17	<b>12,4</b>	<b>12,9</b>	1970	<b>-0,48</b>
Среднее	7,8	11,7			2,2	6,6			9,6	11,2		

Примечания: 1.  $\Delta_{\text{тр}}$ ,  $\Delta_{\text{ст}}$  — показатели эффективности (%) нестационарных моделей тренда и ступенчатых изменений;  $T_{\text{ст}}$  — год ступенчатого перехода от одного стационарного режима к другому;  $R$  — коэффициент корреляции линейного тренда. 2. Жирным шрифтом выделены случаи статистически значимых  $R$  при  $\alpha = 5\%$  и эффективных моделей при  $\Delta \geq 10\%$ .

Для многолетних рядов максимальной толщины льда только в одном случае (р. Тимптон — с. Усть-Тимптон (3248)) коэффициент корреляции модели линейного тренда статистически значим и равен  $R = -0,44$ , а также  $\Delta_{\text{тр}} = 10,2\%$  и  $\Delta_{\text{ст}} = 11,3\%$ .

В целом из анализа результатов, представленных в табл. 3, можно сделать вывод о том, что имеет место уменьшение продолжительности периода ледостава, что связано в основном с более ранней датой окончания ледостава и в меньшей степени с более поздней датой его начала. На отдельных реках, таких как Лена, Чара, Учур, изменение характеристик ледового режима существенно, а на других (Тимптон, Ньюжа) проявляется пока достаточно слабо. Еще один вывод состоит в том, что в случае нестационарных моделей модель ступенчатых изменений эффективнее, чем модель линейного тренда, так как средние значения  $\Delta_{\text{тр}} < \Delta_{\text{ст}}$ . Примеры нестационарных рядов продолжительности ледостава, дат его начала и окончания приведены на рис. 3—5.

На основании предложенных нестационарных моделей для характеристик ледового режима были также определены численные значения изменения продолжительности ледостава и дат его начала и окончания, которые приведены в табл. 4 для модели ступенчатых изменений ( $\Delta_{\text{ст}}$ ) и тренда ( $\Delta_{\text{тр}}$ ). В таблице, кроме того, приводится среднее квадратическое отклонение (СКО) многолетнего ряда ( $\sigma$ ) и жирным шрифтом выделены ситуации, когда установленные изменения превышают СКО.

Приведенные в табл. 4 результаты свидетельствуют о том, что продолжительность ледостава уменьшается на 5—15 дней в зависимости от реки и выбранной

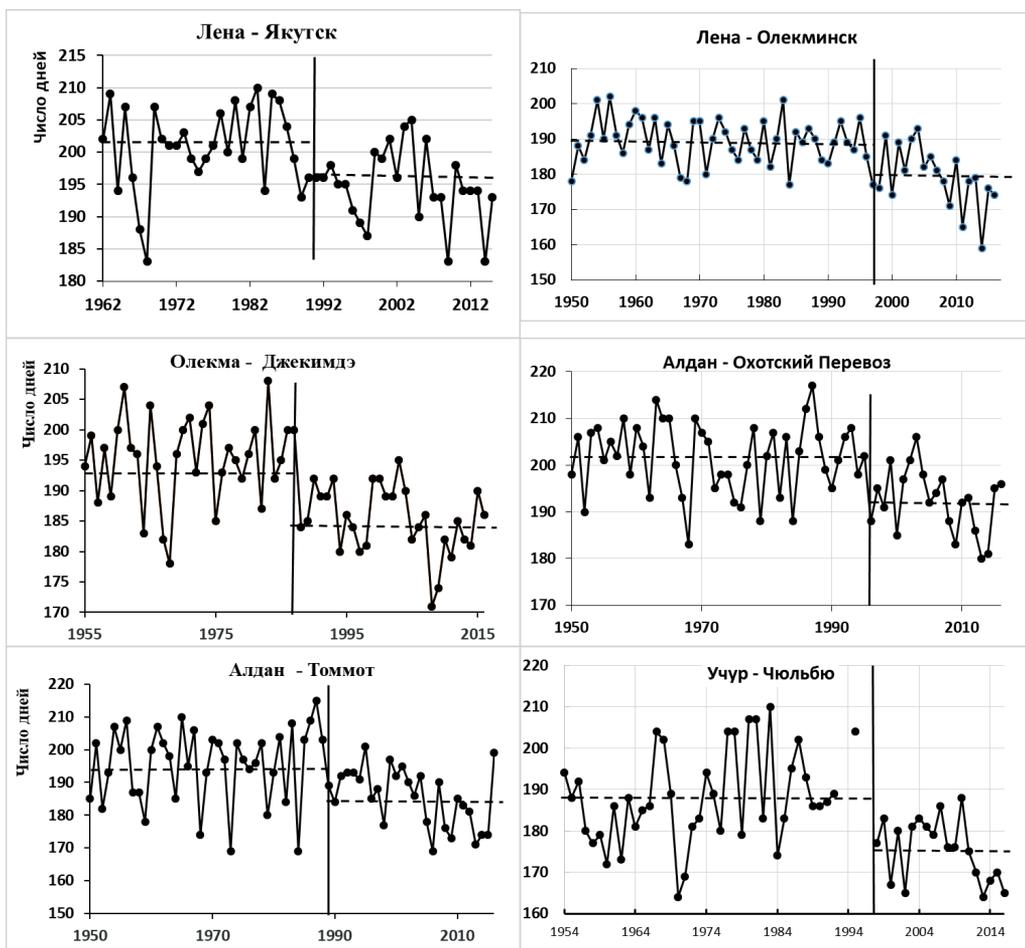


Рис. 3. Нестационарные временные ряды продолжительности (число дней) периода ледостава.

нестационарной модели. При этом по модели линейного тренда получаются более завышенные значения (в среднем на 2—3 дня), так как она учитывает отдельные экстремумы в начале и конце ряда. Превышение СКО имеет место в четырех случаях для модели ступенчатых изменений и в девяти случаях для модели линейного тренда; двойного превышения СКО ( $2\sigma$ ) не наблюдается ни в одном случае. Дата начала ледостава наступает в среднем на 3—4 дня позже, хотя вариация существенна и составляет 0—8 дней. Это увеличение меньше естественной изменчивости или сопоставимо с ней. Дата окончания ледостава наблюдается раньше на 2—11 дней (в среднем на 5—8 дней), причем превышение СКО имеет место в трех случаях для модели ступенчатых изменений и в восьми случаях для модели линейного тренда. Двойного превышения СКО не отмечалось ни в одном случае.

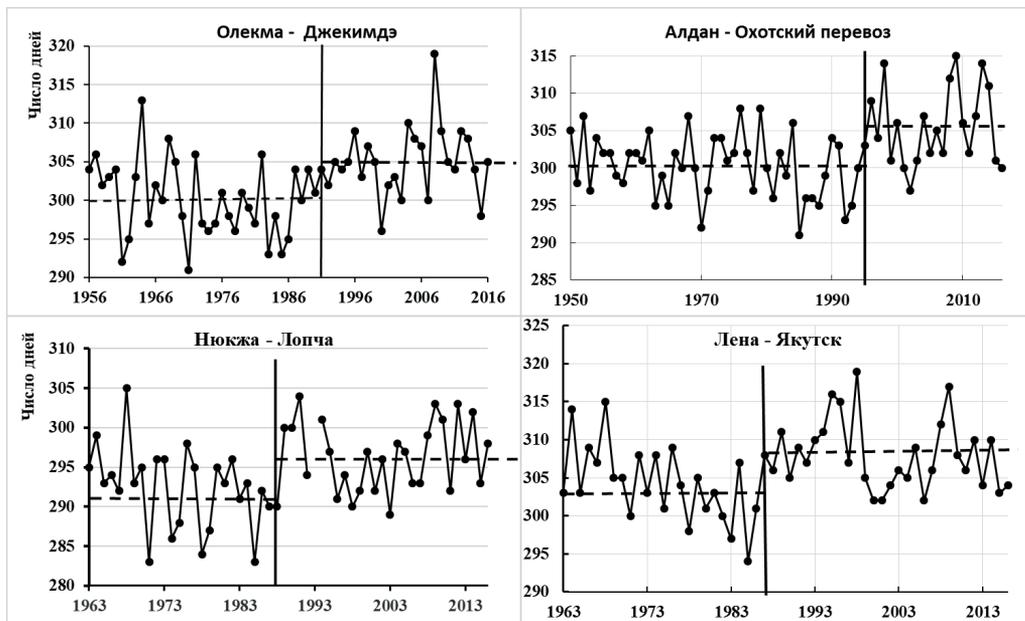


Рис. 4. Нестационарные временные ряды дат начала ледостава (число дней от начала года).

Таблица 4

Климатические изменения (число дней) продолжительности ледостава  $T_{\text{лед}}$ , дат его начала  $T_{\text{нач}}$  и окончания  $T_{\text{кон}}$  для разных рек

Код поста	Река — пункт	$T_{\text{лед}}$			$T_{\text{нач}}$			$T_{\text{кон}}$		
		$\Delta_{\text{ст}}$	$\Delta_{\text{тр}}$	$\sigma$	$\Delta_{\text{ст}}$	$\Delta_{\text{тр}}$	$\sigma$	$\Delta_{\text{ст}}$	$\Delta_{\text{тр}}$	$\sigma$
3035	Лена — Олекминск	-10	-14	8,4	+3	+5	4,8	-7	-9	6,0
3045	Лена — Якутск	-7	-8	6,7	+3	+3	5,0	-4	-6	4,6
3047	Лена — Кангалассы	-7	-9	7,7	+1	0	6,2	-6	-8	4,7
3168	Олекма — Джекимдэ	-10	-15	8,1	+5	+6	5,3	-5	-9	5,8
3169	Олекма — Куду-Кёль	-5	-7	7,7	+1	0	5,8	-4	-8	4,7
3172	Нюкжа — Лопча	-6	-9	7,9	+4	+5	5,1	-2	-4	5,7
3180	Чара — Токко	-8	-11	9,6	+1	0	7,2	-7	-11	6,3
3219	Алдан — Томмот	-9	-15	11,6	+6	+8	9,1	-3	-8	5,7
3225	Алдан — Охотский Перевоз	-10	-13	8,5	+6	+6	5,2	-4	-7	5,2
3248	Тимптон — Усть-Тимптон	-9	-10	11,4	+7	+4	9,1	-2	-6	7,1
3264	Учур — Чюльбю	-13	-12	11,8	+7	0	9,8	-6	-11	6,8
	Среднее	8,5	11,2	9,0	4,5	3,4	6,6	4,5	7,9	5,7

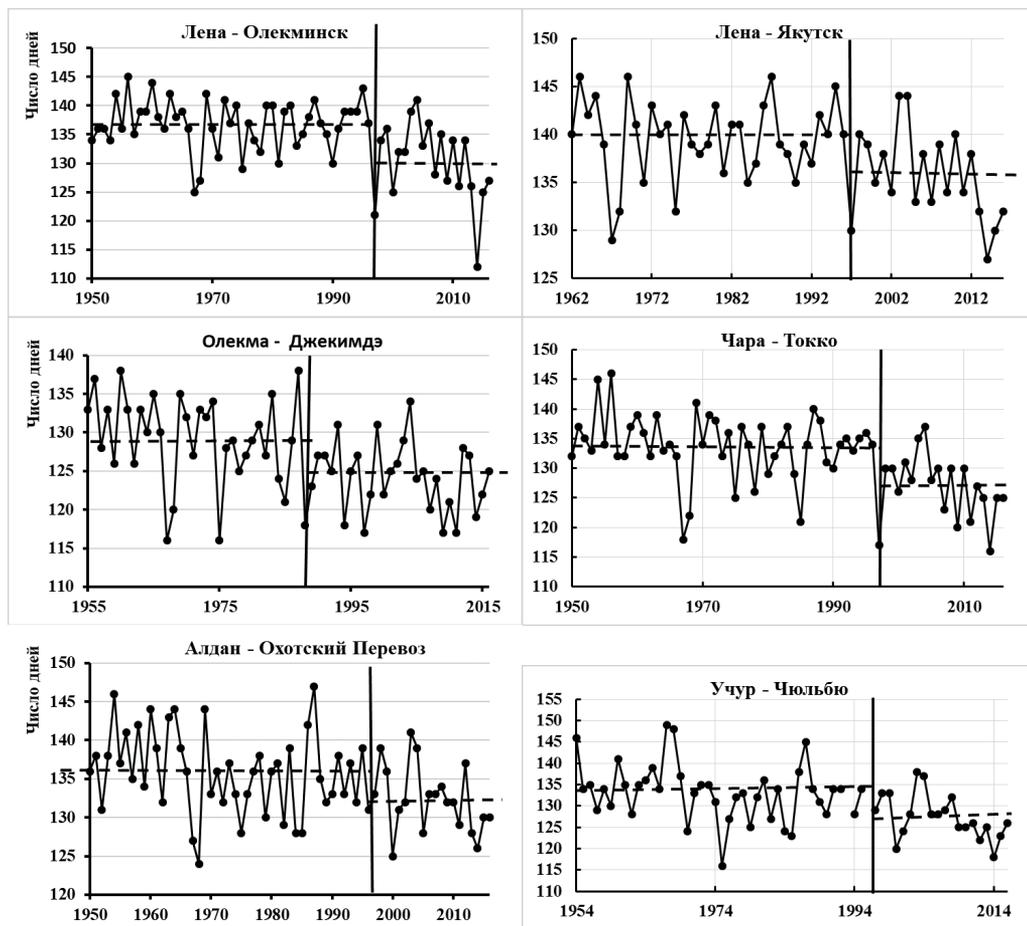


Рис. 5. Нестационарные временные ряды дат окончания ледостава (число дней от начала года).

### Климатические изменения характеристик уровенного режима

Помимо продолжительности ледостава и дат его начала и окончания, рассматривались также и характерные уровни зимнего и весеннего периодов: максимальный речной уровень начала ледостава ( $H_{\text{лдст}}$ ), максимальный уровень ледохода ( $H_{\text{лдох}}$ ), максимальной заторный уровень ( $H_{\text{зат}}$ ), а также для сравнения с ними максимальный за год уровень воды ( $H_{\text{год}}$ ), которые обычно наблюдаются в период весеннего половодья.

Результаты оценки эффективности нестационарных моделей приведены в табл. 5 для трех характерных уровней:  $H_{\text{лдст}}$ ,  $H_{\text{лдох}}$  и  $H_{\text{год}}$ .

Таблица 5

Результаты оценки эффективности нестационарных моделей уровней воды

Код поста	$H_{\text{лдст}}$				$H_{\text{лдж}}$				$H_{\text{год}}$			
	$\Delta_{\text{тр}}$	$\Delta_{\text{ст}}$	$T_{\text{ст}}$	$R$	$\Delta_{\text{тр}}$	$\Delta_{\text{ст}}$	$T_{\text{ст}}$	$R$	$\Delta_{\text{тр}}$	$\Delta_{\text{ст}}$	$T_{\text{ст}}$	$R$
3035	1,3	7,6	2005	0,16	0,0	3,9	1197	0,02	1,7	6,6	1992	0,18
3045	0,4	0,5	1985	0,09	0,9	5,6	1998	0,13	1,3	6,2	1998	0,16
3047	5,5	<b>13,3</b>	1999	<b>0,33</b>	2,2	9,1	1998	0,21	3,6	<b>11,6</b>	1998	0,27
3168	9,6	<b>12,8</b>	1994	<b>0,43</b>	0,1	1,6	1994	0,05	0,5	3,1	2001	0,10
3169	2,6	4,8	1998	0,23	0,0	1,1	1965	0,00	0,7	2,4	1996	0,12
3172	<b>15,9</b>	<b>13,5</b>	2007	<b>0,54</b>	2,1	4,5	2001	-0,20	0,6	2,2	1981	-0,11
3180	<b>14,6</b>	<b>25,2</b>	2003	<b>0,52</b>	2,9	<b>10,2</b>	1998	0,24	1,0	3,2	2006	0,14
3219	8,8	<b>16,3</b>	1997	<b>0,41</b>	0,1	0,6	1996	-0,04	0,2	2,2	1992	0,07
3225	2,8	7,5	2000	0,24	0,2	2,8	1996	0,06	0,0	0,8	1994	0,02
3248	<b>11,6</b>	<b>17,5</b>	1998	<b>0,47</b>	0,1	1,9	1997	0,03	0,6	2,3	1974	-0,11
3264	1,3	9,2	2002	0,16	0,6	3,6	1997	0,11	0,4	2,1	1984	-0,09
Среднее	6,8	11,6			0,8	4,1			1,0	3,9		

Из таблицы следует, что нестационарность проявляется только в половине многолетних рядов максимального уровня начала ледостава, который увеличивается. Для других максимальных уровней (ледохода и максимальных в году) проявление нестационарности средних практически отсутствует. Временные нестационарные ряды максимального уровня начала ледостава приведены на рис. 6.

Средние значения максимального уровня в начале ледостава для нестационарных рядов, приведенных на рис. 6, возросли на 51—83 см в зависимости от пункта наблюдений, что во всех шести случаях превышает СКО, но максимум — в 1,5 раза (для пункта 3180 Чара — Токко).

Увеличение в последние годы максимального уровня начала ледостава является следствием изменения характера образования льда в осенний период. Смещение дат начала образования ледяного покрова на более поздние приводит к увеличению продолжительности шугохода и объема шуги. Русло реки к этому времени уже оказывается частично заполнено шугой.

Эти процессы приводят к увеличению вероятности возникновения заторов льда в период весеннего половодья, максимальный уровень которых часто является причиной мощных наводнений и затопления огромных территорий, как это было, например, в Якутске в 1998 и 1999 гг. и в Ленске в 2001 г. [2, 17]. Наиболее затороопасным является участок р. Лены у поста 3047 Лена — Кангалассы, где с конца 1980-х годов повторяемость максимального уровня заторного происхождения увеличилась в два раза: с девяти до 19 случаев. В ряду максимального уровня по посту 3169 Олекма — Куду-Кель более 50 % значений (47 из 67) заторного генезиса. По другим створам исследуемого района число случаев максимального заторного уровня в рядах составило от четырех (пункт 3219) — пяти (пункт 3225) до 23 (пункт 3168) — 28 (пункт 3047). Поэтому проверка на стационарность при таком ограниченном материале свидетельствует об отсутствии статистически значимой стационарности в средних значениях этих рядов.

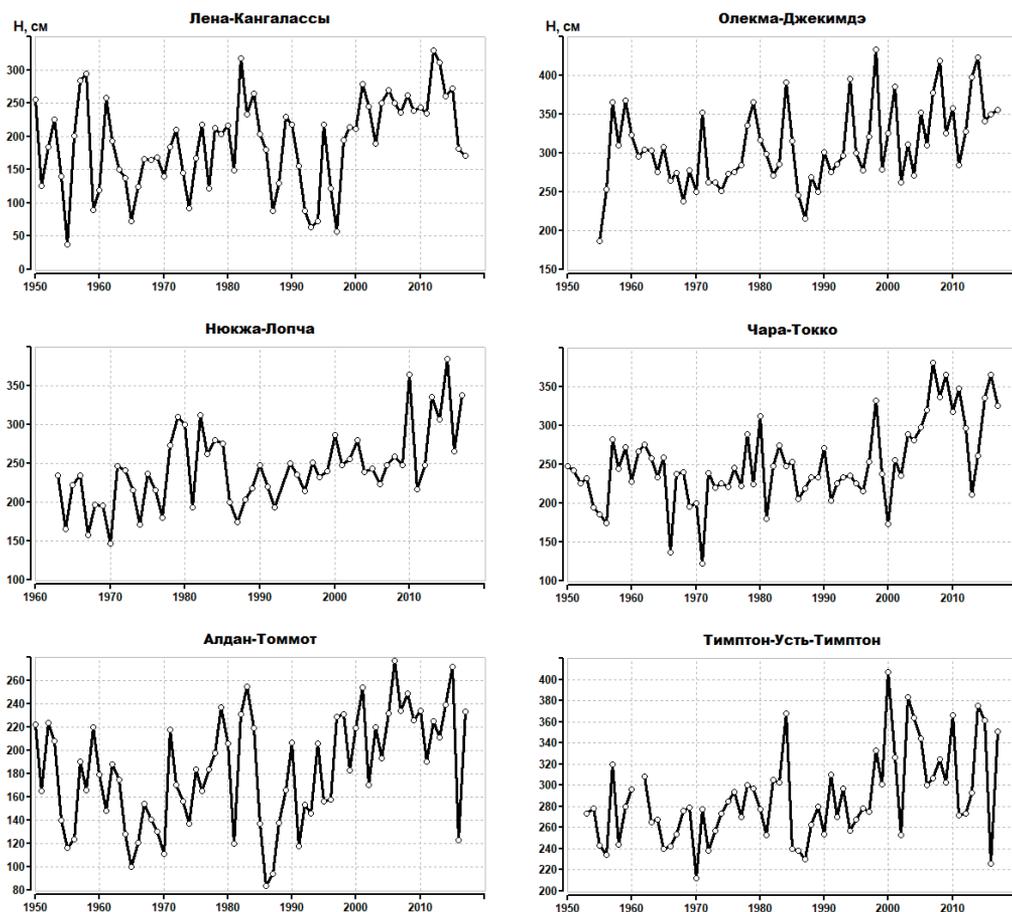


Рис. 6. Нестационарные временные ряды максимального уровня (см) начала ледостава.

Хотя наводнения заторного характера наблюдаются не ежегодно, причиняемый ими материальный ущерб достигает многих миллионов рублей. Поэтому исследование причин их формирования, разработка основанных на учете осенних и весенних факторов методик прогноза максимального уровня начала ледостава, максимальной толщины льда, температуры воздуха в зимний период, а также оценка потенциального риска затопления хозяйственно освоенных территорий являются актуальными [5].

### Заключение

В результате выполненного исследования характеристик ледового режима на реках Республики Саха (Якутия) можно сделать следующие выводы.

1. Максимальная толщина льда на реках пока остается практически стационарной и статистически значимого ее уменьшения не наблюдается.

2. Продолжительность ледостава на реках уменьшилась на 1—2 недели в зависимости от конкретного речного водосбора; это уменьшение превышает естественную изменчивость (хотя пока и незначительную — в среднем на 20 %) и наблюдается в 80 % случаев.

3. Продолжительность ледостава уменьшилась в основном за счет более ранней даты окончания ледостава: в среднем на 6—8 дней при вариации от 2 до 11 дней. При этом превышение естественной изменчивости имело место в 72 % случаев.

4. Начало ледостава сдвигается на более поздние сроки. Это смещение составляет в среднем всего 3—4 суток с максимумом 8 суток, а превышение над естественной изменчивостью составляет не более 15 % и отмечается всего в 18 % случаев.

5. Из характерных зимних уровней воды нестационарность проявляется лишь в многолетних рядах максимального уровня начала ледостава, который возрастает. Хотя это увеличение отмечается только для половины рядов и превышает естественную изменчивость максимум на 50 %, это существенно повышает значимость осеннего фактора в процессах образования максимальных заторных уровней.

6. Установлено, что в случае нестационарных средних модель ступенчатых изменений является более эффективной для временных рядов, чем модель линейного тренда, которая к тому же за счет учета экстремумов в начале и в конце ряда завывает сами эти изменения на 20—30 %.

### Список литературы

1. Алексеев Г.В., Данилов А.И., Кацов В.М., Кузьмина С.И., Иванов Н.Е. Морские льды Северного полушария в связи с изменением климата в XX и XXI веках по данным наблюдений и моделирования // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2009. Т. 45, № 6. С. 723—735.
2. Бузин В.А., Горошкова Н.И., Стриженов А.В. Максимальные заторные уровни воды северных рек России в условиях изменения климата и антропогенного воздействия на процесс заторообразования // Метеорология и гидрология. 2014. № 12. С. 55—61.
3. Варламов С.П., Скачков Ю.Б., Скрябин П.Н., Шендер Н.И. Тепловое состояние верхних горизонтов криолитозоны Центральной Якутии / В сб.: Труды 10-й Междунар. конф. по мерзлотоведению. Салехард: Печатник, 2012. Т. 3. С. 47—52.
4. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М.: изд-во ИГКЭ, 2015. 1008 с.
5. Горошкова Н.И., Стриженов А.В. Происхождение и потенциальный риск заторных наводнений на реках Восточной Сибири / В сб.: Доклады IV Всероссийской научной конференции «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды». СПб: изд-во Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского, 2016.
6. Груза Г.В., Ранькова Э.Я. Ожидаемые и наблюдаемые изменения климата России: температура воздуха. Обнинск: изд-во ВНИИГМИ — МЦД, 2012. 194 с.
7. Закс Л. Статистическое оценивание. М.: Статистика, 1976. 598 с.
8. Кириллина К.С., Лобанов В.А. Оценка современных климатических изменений температуры воздуха на территории республики Саха (Якутия) // Ученые записки РГГМУ. 2015. № 38. С. 137—151.

9. *Кобышева Н.В., Наровлинский Г.Я.* Климатологическая обработка метеорологической информации. Л.: Гидрометеоздат, 1978. 295 с.
10. *Лобанов В.А., Шадурский А.Е.* Применение эмпирико-статистических методов для моделирования и анализа климатических изменений // Ученые записки РГГМУ. 2010. № 14. С. 73—88.
11. *Лобанов В.А., Смирнов И.А., Шадурский А.Е.* Практикум по климатологии. Учебное пособие. Часть 1. СПб, 2011. 144 с.
12. *Лобанов В.А., Смирнов И.А., Шадурский А.Е.* Практикум по климатологии. Учебное пособие. Часть 2. СПб, 2012. 141 с.
13. *Лобанов В.А.* Лекции по климатологии. Часть 2. Динамика климата. Кн.1. СПб: изд-во РГГМУ, 2016. 332 с.
14. *Лобанов В.А.* Лекции по климатологии. Часть 2 Динамика климата. Кн. 2. СПб: изд-во РГГМУ, 2018. 377 с.
15. *Малинин В.Н.* Статистические методы анализа гидрометеорологической информации. СПб: изд-во РГГМУ, 2008. 408 с.
16. Рекомендации по статистическим методам анализа однородности пространственно-временных колебаний речного стока. Л.: Гидрометеоздат, 1984. 78 с.
17. *Рождественский А.В., Бузин В.А., Лобанов В.А.* Исследование условий формирования и расчеты максимальных уровней воды на р. Лене у г. Ленска // Метеорология и гидрология. 2003. № 2. С. 68—76.