

УДК 556.06  
М. В. Ушаков<sup>1</sup>

## ***Продолжительность ледового сезона на реках Тауйской губы в условиях климатических изменений***

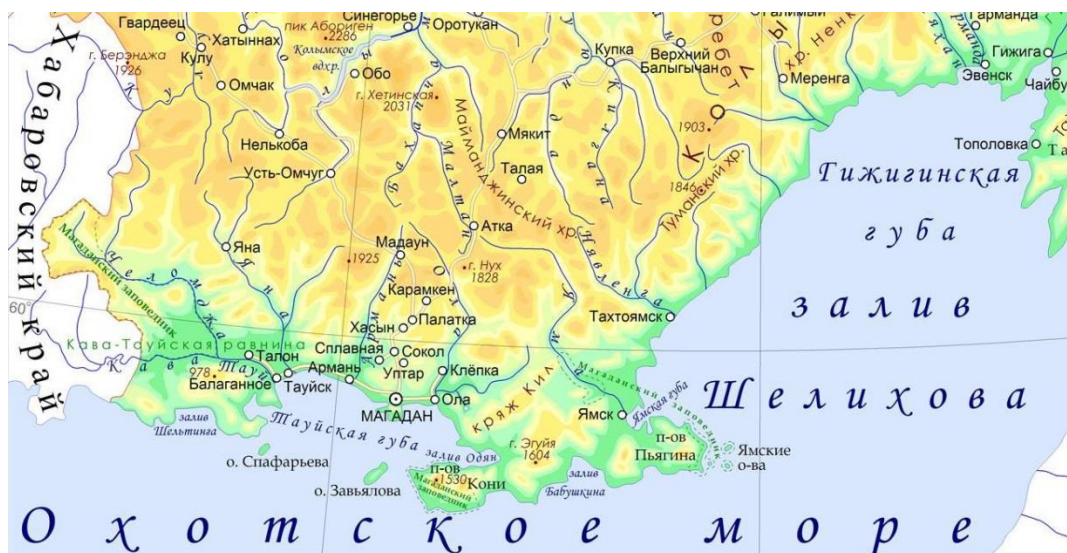
ФГБУН «Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт им. Н.А. Шило»  
Дальневосточного отделения Российской академии наук,  
г. Магадан, Российская Федерация  
e-mail: mvilorich@narod.ru

**Аннотация.** Ставилась цель исследовать многолетние колебания продолжительности ледового сезона (ПЛС) рек Тауйской губы. Использовались данные наблюдений на семи гидрологических постах. Методами исследования послужили анализ динамической средней ПЛС, скользящее 30-летнее осреднение, построение графических связей, спектральный анализ. Установлено, что многолетний ход ПЛС имеет отрицательный тренд. Колебания ПЛС содержат циклы с периодом 3, 7, и 10 лет. Предложена схема прогноза ПЛС до 2050 г.

**Ключевые слова:** ледовый режим рек, изменения климата, критерий Херста, спектральный анализ, прогноз

### **Введение**

Территория бассейнов рек, впадающих в Тауйскую губу, является наиболее освоенной на северном побережье Охотского моря [1] (рис. 1).



**Рис. 1.** Северное побережье Охотского моря

Как известно, в настоящее время происходят климатические изменения гидрологического режима рек [2; 30; 4; 5; 6]. Этот процесс коснулся и рек Тауйской губы. Так в статье [1] установлено, что современные климатические изменения привели к росту минимального месячного зимнего стока этих рек.

Хорошим гидроклиматическим показателем может являться продолжительность периода в жизни рек, когда на них имеются ледовые явления (сало, забереги, шугоход, ледостав, ледоход, остаточные забереги, навалы льда на берегах). В данной работе под ледовым сезоном понимается период со всеми ледовыми явлениями на реках, выраженный в днях.

В настоящем исследовании ставится цель, проанализировать многолетние колебания продолжительности ледового сезона (ПЛС) рек Тауйской губы в условиях современных климатических изменений.

Рассматриваемый регион вызывает интерес исследователей не только поднимающейся экономикой, но и своеобразием и уникальностью растений и животных, высокой продуктивностью сформировавшихся здесь биологических ресурсов [7].

Ледовый режим рек рассматриваемых рек сказывается на работе гидротехнических сооружений, ледовых и паромных переправ, рыболовецких бригад. Ледовый сезон здесь начинается в октябре и заканчивается в конце мая, иногда в первой половине июня [8].

### Материалы и методы

Погодичные значения ПЛС рек Тауйской губы взяты с справочников [9; 10; 11; 12] и Гидрологических ежегодников Государственного водного кадастра.

Статистические параметры рядов ПЛС рассчитывались методом моментов с соблюдением требований [13] (табл.). В соответствии с критерием Херста [14] все ряды имеют тренд.

Таблица 1

Статистические параметры продолжительности ледового сезона

Река – пункт	Площадь водосбора, км <sup>2</sup>	Длина ряда, лет	Среднее, дни	$\sigma$ , дни	$C_v$	$C_s/C_v$	Показатель Херста
Ола – п. Ола	8570	43	212	14,6	0,069	3,5	0,79
Дукча – устье	330	59	223	12,0	0,054	0	0,73
Магаданка – г. Магадан	48,5	29	221	19,4	0,088	8	0,65
Армань – у моста	7770	41	206	9,5	0,046	2,5	0,59
Хасын – п. Хасын	682	79	228	10,5	0,046	3,5	0,67
Уптар – п. Уптар	265	47	216	14,0	0,065	4,5	0,71
Тауй – с. Талон	25100	66	220	8,4	0,038	2	0,76

Примечания:  $\sigma$  – среднеквадратичное отклонение;  $C_v$  – коэффициент вариации;  $C_s$  – коэффициент асимметрии.

Составлена автором

Методами исследования послужили анализ динамической средней ПЛС, скользящее 30-летнее осреднение, построение графических связей, спектральный анализ. Спектральная функция  $S(T)$  рассчитывалась с использованием весовой функции Хэмминга по формуле [15].

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

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

### Результаты и обсуждение

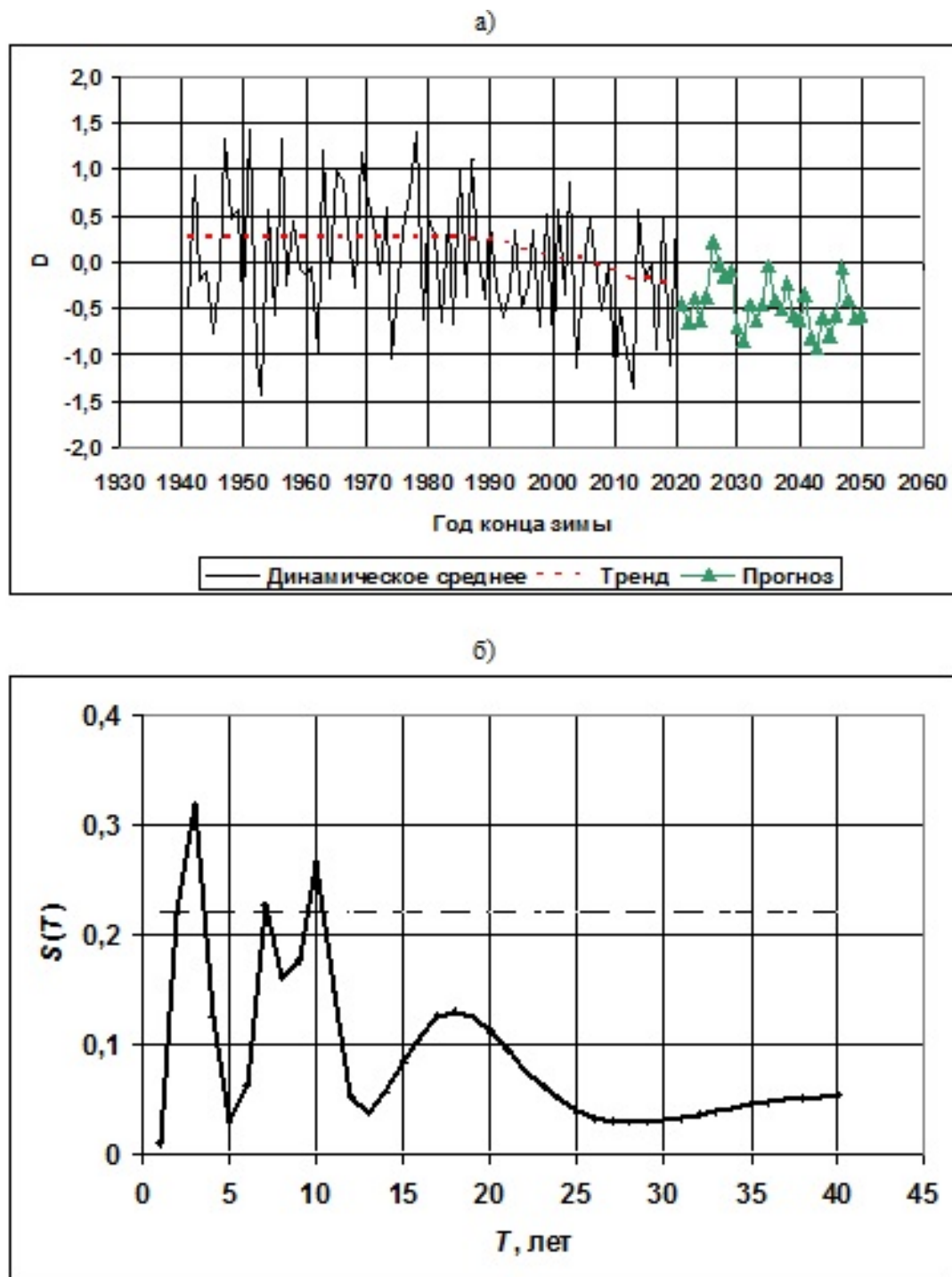
По временным рядам продолжительности ледового сезона был вычислен ряд динамической средней (рис. 2а)

$$D_i = \sum_{j=1}^m d_{i,j} / m, \quad (2)$$

где  $m$  – число гидрологических постов;  $d_{i,j}$  – ПЛС в пункте  $j$  в год  $i$ , выраженная в стандартных отклонениях.

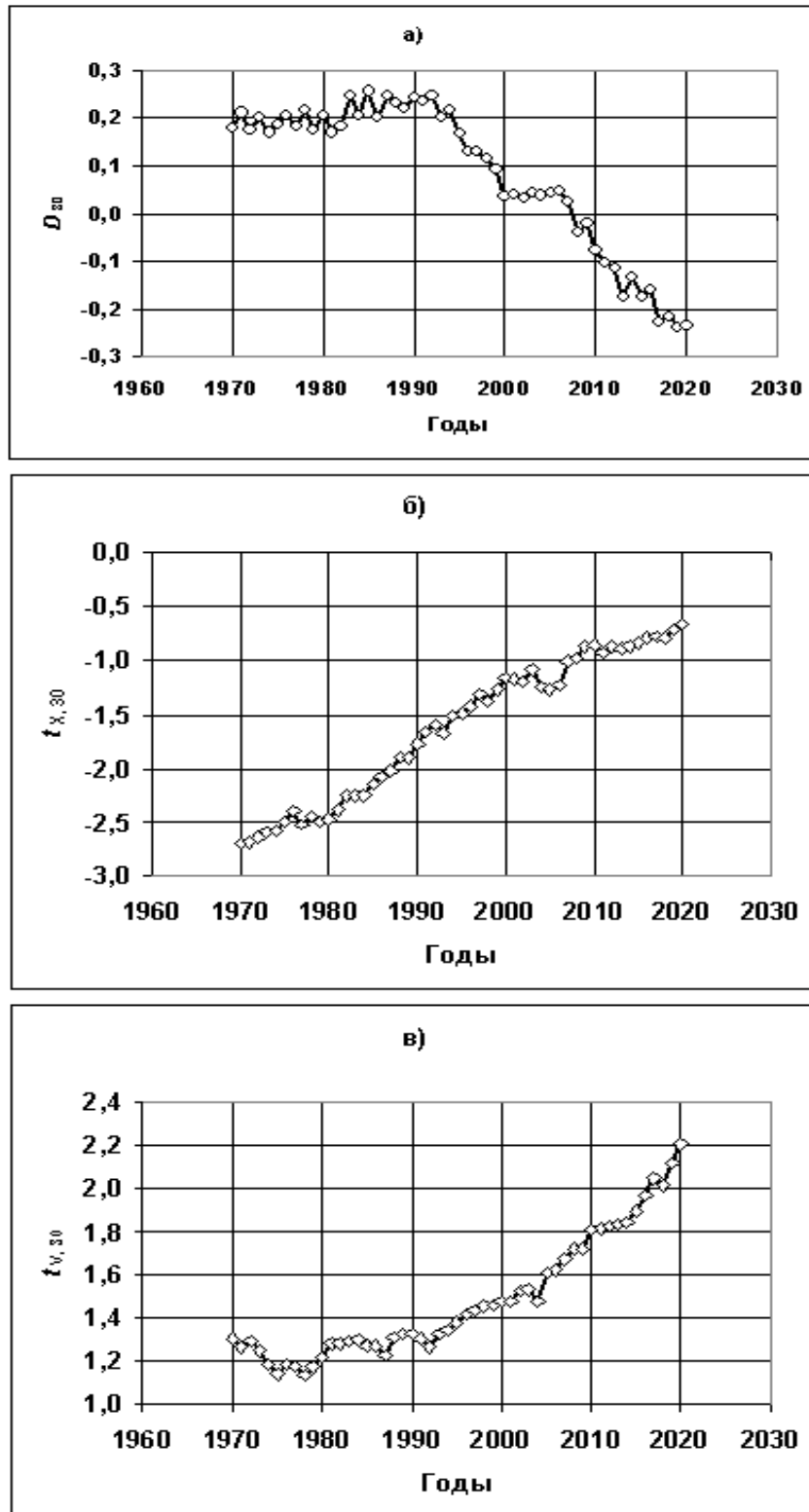
Спектральный анализ ряда отклонений ПЛС от линии тренда выявил статистически значимые гармоники на периодах 3, 7 и 10 лет (рис. 2б).

Наглядное представление о климатических изменениях ПЛС позволяет взгляд на графики с динамикой температуры воздуха в Магадане в октябре и мае (рис. 3). Все эти характеристики выражены в скользящих 30-летних средних. Иными словами, мы можем увидеть, как со временем меняются климатические «нормы», рассчитанные за 30-летие.



**Рис. 2.** Динамическое среднее продолжительности ледового сезона  $D$  (а), и спектрограмма ее отклонений от линии тренда (б). Пунктиром проведена 5-ти процентная доверительная граница.

*Составлен автором*

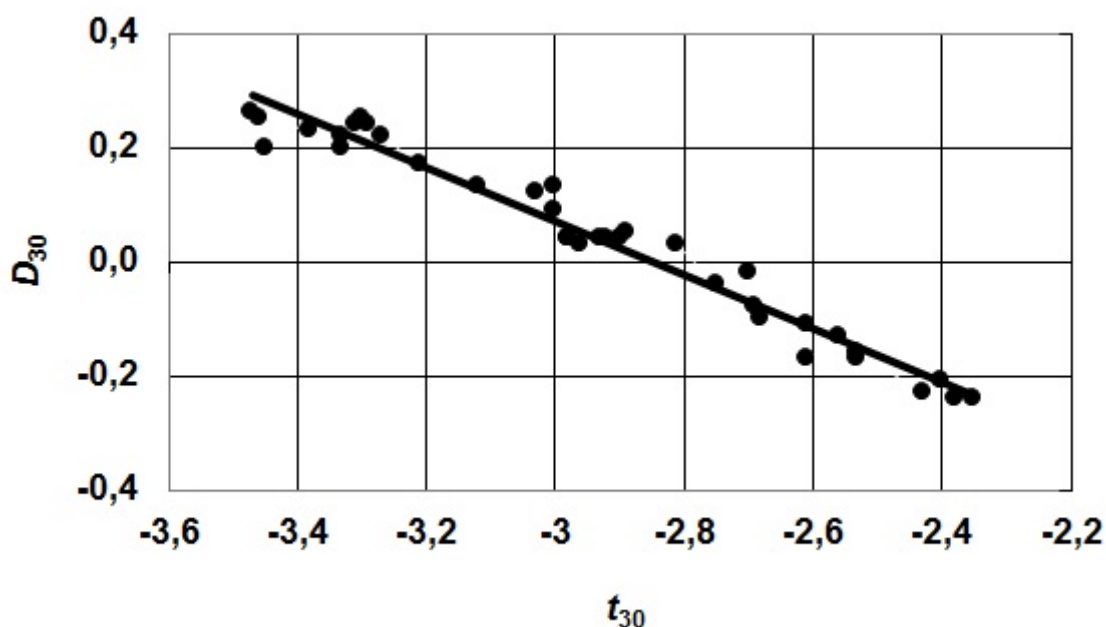


**Рис. 3.** Многолетняя динамика «норм» продолжительности ледового сезона (а), температуры воздуха в октябре (б) и мае (в).  
*Составлен автором*

На рис. 3 видно, что рост температур воздуха в октябре, когда начинается ледообразование на реках, и в мае, когда реки освобождаются ото льда, отражается на ПЛС. Можно сделать вывод, что уменьшение ПЛС вызван климатическим ростом температуры воздуха. Это утверждение подтверждается и графиком связи 30-летних средних годовых температур воздуха в Магадане и динамической средней продолжительности ледового сезона рек исследуемого региона (рис. 4)

$$D_{30} = -0,468t_{30} - 1,33, \text{ коэффициент корреляции } r = 0,98, \quad (3)$$

где  $D_{30}$  – динамическая средняя продолжительности ледового сезона со скользящим осреднением 30 лет;  $t_{30}$  – 30-летняя скользящая средняя годовая температуры воздуха в г. Магадане.



**Рис. 4.** Связь скользящих 30-летних динамической средней продолжительности ледового сезона  $D_{30}$  и 30-летних скользящих средних годовых температур воздуха в Магадане  $t_{30}$ .

*Составлен автором*

При помощи формулы (3) можно построить будущую динамику «нормы» ПЛС при различных сценариях потепления климата. Сценарий поведения нормы динамической средней ПЛС при потеплении климата на  $1^{\circ}\text{C}$  представлен на рис. 2а.

На основе выявленных гармоник с периодом 3, 7 и 10 лет (см. рис. 2б) можно спрогнозировать временной ход динамической средней ПЛС, выраженной в отклонениях от линии тренда

$$\Delta D_i = 0,229 \cos(2\pi(i - 1940 + 1)/3) + 0,166 \cos(2\pi(i - 1940 + 4)/7) + 0,248 \cos(2\pi(i - 1940 + 3)/10), \quad (4)$$

где  $i$  – год (четыре цифры).

Опираясь на формулы (3), (4) можно получить уравнение для предвычисления погодичных значений динамической средней ПЛС

$$D_i = 0,229 \cos(2\pi(i - 1940 + 1)/3) + 0,166 \cos(2\pi(i - 1940 + 4)/7) + 0,248 \cos(2\pi(i - 1940 + 3)/10) - 0,468t_{30,i} - 1,33. \quad (5)$$

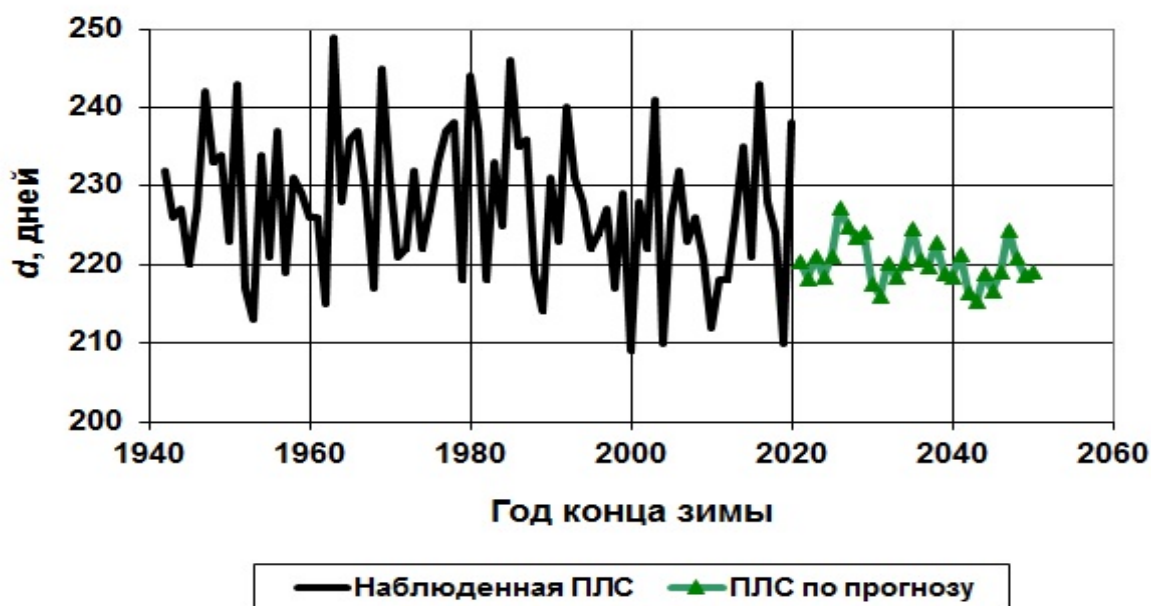
На рис. 2а приведен пример прогноза до 2050 г. динамической средней ПЛС при повышении нормы среднегодовой температуры воздуха в Магадане на 1°C.

Переход от динамической средней к ПЛС в конкретном пункте осуществляется преобразованием

$$d_{i,j} = D_i \sigma_j + \tilde{d}_j, \quad (6)$$

где  $D_i$  – динамическая средняя, вычисленная по формуле (5);  $\tilde{d}_j$  – норма ряда  $j$ , вычисленная за последние 30 лет;  $\sigma_j$  – среднеквадратичное отклонение ряда  $j$ .

На рис. 5 показан пример предвычисления погодичных значений ПЛС для р. Хасына у п. Хасына.



**Рис. 5.** Многолетняя динамика продолжительности ледового сезона (ПЛС) и ее прогноз до 2050 г. на р. Хасыне – п. Хасын.

*Составлен автором*

Уменьшение дисперсии прогнозируемой величины вполне объяснимо свойством всех прогнозов – тяготение расчетной величины к среднему или математическому ожиданию [16].

### **Выводы**

1. Многолетний ход продолжительности ледового сезона (ПЛС) на реках Тауйской губы имеет отрицательный тренд, обусловленный потеплением климата.

2. Колебания ПЛС содержат циклы с периодом 3, 7, и 10 лет.

3. Предложена схема прогноза ПЛС до 2050 г.

4. К методу предвычисления ПЛС конечно же нельзя относиться, как к продукту официальных органов, уполномоченных на выпуск прогнозов. Но данное исследование позволяет задать общий тон в направлении исследований климатических изменений в ледовом режиме рек Северо-Востока России.

### **Литература**

1. Глотов В. Е., Глотова Л. П., Ушаков М. В. Влияние климата на минимальный зимний сток рек Тауйского экорегиона // Вестник Северо-Восточного научного центра ДВО РАН. 2018, № 3. С. 36-42.
2. Gartsman B. I., Lupakov S. Yu. Effect of Climate Changes on the Maximal Runoff in the Amur Basin: Estimation Based on Dynamic–Stochastic Simulation. *Water Resources*, 2017, vol. 44(5), pp. 697–706.
3. 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(9), pp. 640–647.
4. Makhmudov R. N. Regional Climate Changes and River Runoff in Azerbaijan. *Russian Meteorology and Hydrology*, 2016, vol. 41(9), pp. 635–639.
5. 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(11–12), pp. 735–746.
6. Mikhailova 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(6), pp. 793–807.
7. Landscapes, climate and natural resources of the Tauri Bay of the Sea of Okhotsk. Vladivostok: Dalnauka publ, 2006. 525 p.
8. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 19. Северо-Восток. Ленинград: Гидрометеиздат, 1969. 282 с.
9. Основные гидрологические характеристики. Т. 19. Северо-Восток. Л.: Гидрометеиздат, 1966. 380 с.
10. Основные гидрологические характеристики. Т. 19. Северо-Восток. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 230 с.
11. Основные гидрологические характеристики. Т. 19. Северо-Восток. Л.: Гидрометеиздат, 1978. 227 с.
12. Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Т. I, вып. 17. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 429 с.
13. СП 33-101-2003. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. – М.: Изд-во Госстрой России, 2004. 74 с.
14. Hurst H. E. Long-term storage capacity of reservoirs. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*. 1951. V. 116. P. 770-808.



15. Шелутко В. А. Численные методы в гидрологии. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 239 с.
16. Георгиевский Ю. М., Шаночкин С. В. Гидрологические прогнозы. Учебник. СПб., изд. РГГМУ, 2007. 436 с.

M. V. Ushakov

***The duration of the ice season on the rivers of the Tauri estuary in the context of climate change***

---

North-Eastern Integrated Research Institute named after  
N. A. Shilo of the Far Eastern Branch of the Russian Academy  
of Sciences, Magadan, Russian Federation  
*e-mail: mvilorich@narod.ru*

**Abstract.** *The aim was to investigate the long-term fluctuations in the duration of the ice season (DIS) of the rivers of the Tauri estuary. Observational data at seven hydrological stations were used. The methods of the study were the analysis of the dynamic mean DIS, 30-year moving average, plotting, and spectral analysis. It has been established that the long-term course of the DIS has a negative trend. DIS fluctuations contain cycles with a period of 3, 7, and 10 years. A scheme for forecasting the DIS up to 2050 is proposed.*

**Keywords:** *river ice regime, climate change, Hurst criterion, spectral analysis, forecast*

### **References**

1. Glotov V. E., Glotova L. P., Ushakov M. V. Vliyanie klimata na minimal'nyj zimmij stok rek Taujskogo jekoregiona. Bulletin of the North-Eastern Scientific Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences. 2018, No 3. pp. 36-42. (in Russian).
2. Gartsman B. I., Lupakov S. Yu. Effect of Climate Changes on the Maximal Runoff in the Amur Basin: Estimation Based on Dynamic–Stochastic Simulation. Water Resources, 2017, vol. 44(5), pp. 697-706. (in English).
3. 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(9), pp. 640–647. (in English).
4. Makhmudov R. N. Regional Climate Changes and River Runoff in Azerbaijan. Russian Meteorology and Hydrology, 2016, vol. 41(9), pp. 635–639. (in English).
5. 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(11–12), pp. 735–746. (in English).
6. Mikhailova 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(6), pp. 793–807. (in English).
7. Landscapes, climate and natural resources of the Tauri Bay of the Sea of Okhotsk. Vladivostok: Dalnauka publ, 2006. 525 p. (in English).

8. Resursy poverhnostnyh vod SSSR. T. 19. Severo-Vostok. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1969. 282 p. (in Russian).
9. Osnovnye gidrologicheskie harakteristiki. T. 19. Severo-Vostok. L.: Gidrometeoizdat, 1966. 380 p. (in Russian).
10. Osnovnye gidrologicheskie harakteristiki. T. 19. Severo-Vostok. L.: Gidrometeoizdat, 1974. 230 p. (in Russian).
11. Osnovnye gidrologicheskie harakteristiki. T. 19. Severo-Vostok. L.: Gidrometeoizdat, 1978. 227 p. (in Russian).
12. Mnogoletnie dannye o rezhime i resursah poverhnostnyh vod sushi. T. I, vyp. 17. L.: Gidrometeoizdat, 1985. 429 p. (in Russian).
13. SP 33-101-2003. Opredelenie osnovnyh raschetnyh gidrologicheskikh harakteristik. – M.: Izd-vo Gosstroj Rossii, 2004. 74 p. (in Russian).
14. Hurst H. E. Long-term storage capacity of reservoirs. Transactions of the American Society of Civil Engineers. 1951. V. 116. pp. 770-808. (in English).
15. Shelutko V.A. Chislennyye metody v gidrologii. L.: Gidrometeoizdat, 1991. 239 s.
16. Georgievskij Ju.M., Shanochkin S.V. Gidrologicheskie prognozy. Uchebnik. SPb., izd. RGGMU, 2007. 436 s. (in Russian).

*Поступила в редакцию 10.04.2022 г.*