

# ***В ПОРЯДКЕ ОБСУЖДЕНИЯ***

---

УДК 551.467:[551.524+551.583](262.81)

## **КЛИМАТИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ТОЛЩИНЫ ЛЬДА НА СЕВЕРНОМ КАСПИИ**

***В.А. Лобанов, Ж.К. Наурозбаева***

Российский государственный гидрометеорологический университет,  
lobanov@EL6309.spb.edu

Анализируются климатические изменения максимальной толщины льда в семи пунктах измерений на акватории Северного Каспия и в одном пункте в дельте Волги. Установлены влияющие метеорологические факторы на основе построенных зависимостей между максимальной толщиной льда и температурой воздуха. Получено, что максимальная толщина льда уменьшается на всех станциях, но в большей степени на северо-востоке, в меньшей на северо-западе, а на южных станциях уже достигает критических значений, при которых лед в отдельные годы не формируется. Основной причиной является уменьшение сумм отрицательных температур воздуха за холодный период и повышение температуры в марте, в то время как температура в остальные месяцы холодного периода пока изменяется мало.

*Ключевые слова:* Северный Каспий, максимальная толщина льда, среднемесячная температура воздуха, изменение климата, уменьшение толщины льда, карта прироста температуры.

## **CLIMATE CHANGES OF ICE THICKNESS ON THE NORTHERN CASPIAN**

***V.A. Lobanov, Zh.K. Naurozbayeva***

Russian State Hydrometeorological University

The climatic changes in the maximum ice thickness at seven measurement points in the water area of the Northern Caspian and at one point in the Volga delta are analyzed. Influencing meteorological factors are established on the basis of the constructed dependences between the maximum ice thickness and air temperature. It is obtained that the maximum thickness of ice decreases at all stations, but to a greater extent in the northeast, to a lesser extent in the northwest, and at the south station it already reaches critical values at which ice does not form in same years. The main reason is a decrease in the sum of negative air temperatures over the cold period and an increase in temperature in March, while the temperature in the other months of the cold period of the year has not changed much.

*Keywords:* Northern Caspian, maximum ice thickness, average monthly air temperature, climate change, ice thickness reduction, temperature increase map.

### **Введение**

Северная часть Каспийского моря ежегодного покрывается льдом, а в умеренные и суровые зимы ледовые явления наблюдаются и в средней части моря. Наиболее велика продолжительность холодного периода в северо-восточной части Северного Каспия, где она может достигать пяти месяцев; в северо-западной части акватории продолжительность холодного периода может составлять до

четырёх месяцев за год [29]. Изучением формирования ледового режима на Каспийском море, его развития и влияющих на эти процессы факторов занимались многие исследователи, но эта тема остается актуальной, причем на сегодняшний день ее важность возрастает в связи с современным изменением климата.

Впервые оценка ледового режима была проведена по результатам экспедиции 1914—1915 гг. под руководством Н.М. Книповича [11]. В 1960-е годы сотрудниками Института географии АН Азербайджана проводились обстоятельные исследования ледового режима с проведением экспедиций, в результате которых было получено полное описание гидрометеорологического режима Каспия, приведенное в серии «Гидрометеорология и гидрохимия морей» [5]. В настоящее время Каспийское море разделяют пять государств, каждое из которых проводит собственные исследования и вносит определенный вклад в развитие гидрометеорологической изученности данного водоема как уникального мирового природного объекта [24—28]. В связи с тем, что лед образуется преимущественно в северной части акватории, исследованием ледового режима активно занимаются, прежде всего, ученые России [1—3, 6, 22—23] и Казахстана [8—10].

### **Цель работы и исходные данные**

Цель настоящей работы заключается в оценке изменений максимальной толщины льда в северной части Каспийского моря и изучении климатических факторов, которые эти изменения определяют.

В связи с тем, что ледовый покров отличается большой динамичностью и наблюдается преимущественно в северной части моря, использовались данные по ледовому режиму, собранные за многолетний период на семи гидрометеорологических станциях на севере и в центральной части Каспийского моря (Атырау, Пешной, о. Кулалы, Форт-Шевченко, о. Тюлений, о. Искусственный, Лагань) и на одной станции в г. Астрахани (ледовый режим в устье Волги). Помимо данных о максимальной толщине льда, во всех этих пунктах наблюдений (за исключением пункта о. Искусственный) имелись многолетние ряды среднемесячных значений температуры воздуха за холодный период (с октября по март). Для оценки территориальных изменений климата в районе северной и центральной части Каспийского моря была привлечена дополнительная информация — многолетние ряды среднемесячной температуры воздуха на 21 метеостанции вблизи рассматриваемой акватории моря.

Схема расположения пунктов наблюдений за ледовым режимом на Северном Каспии и за климатическими характеристиками на ближайших метеостанциях приведена на рис. 1, а информация о продолжительности наблюдений — в табл. 1.

В результате были сформированы две региональные базы многолетних рядов данных: максимальная толщина льда по восьми пунктам (четыре на территории России и четыре на территории Казахстана) и среднемесячная температура воздуха с октября по март по 28 пунктам наблюдений (13 в России и 15 в Казахстане).

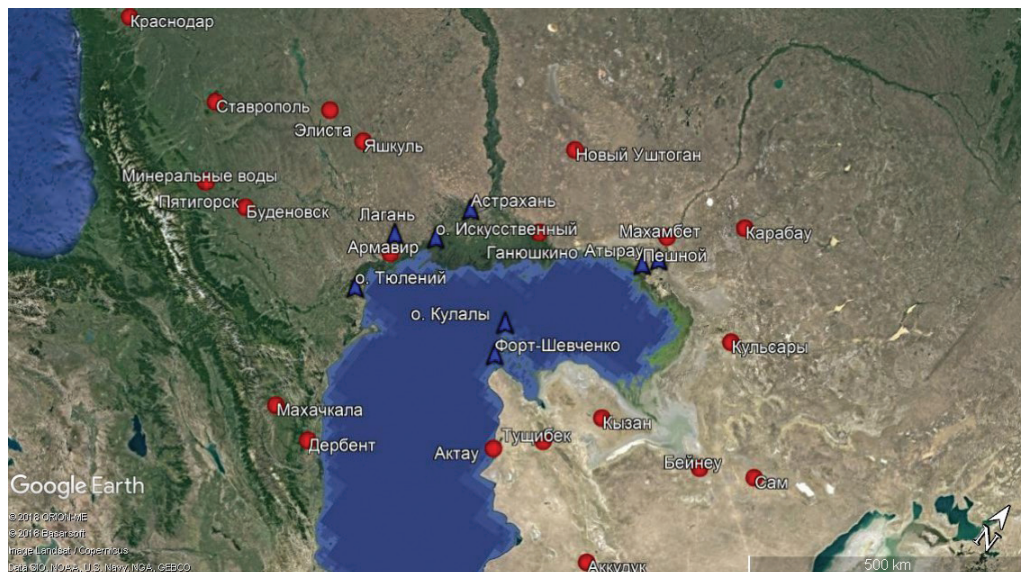


Рис. 1. Расположение гидрометеорологических станций и постов.

Треугольники — наблюдения за толщиной льда и температурой воздуха,  
кружки — наблюдения только за температурой воздуха.

Поскольку ряды имели пропуски наблюдений, было осуществлено восстановление пропусков и приведение к многолетнему периоду по уравнениям связи с рядами в пунктах-аналогах на основе известной методики [12, 21]. При этом для толщины льда минимальное значение коэффициента корреляции  $R_{\min}$  задавалось равным 0,7, так как они были достаточно слабо связаны по территории, а для среднемесячной температуры воздуха  $R_{\min} = 0,85$ . Следует отметить, что в рядах максимальной толщины льда отсутствие данных имело место и по естественным причинам: льда не наблюдалось или лед был недостаточной толщины для проведения измерений — в такие годы восстановление данных не проводилось.

В результате приведения к многолетнему периоду и восстановления пропусков удалось получить практически непрерывные ряды максимальной толщины льда с 1940—1950-х годов по 2015—2016 гг. В среднем продолжительность рядов увеличилась на 12 лет. При этом в российском секторе, на северо-западе Каспия, связанность данных была выше и продолжительность увеличилась на 23 года, тогда как в казахстанском секторе — в среднем всего на 1,5 года (от 0 до 3 лет). Ряды наблюдений за температурой воздуха были изначально и более продолжительными, и лучше связанными по пространству, поэтому для них рассматриваемый период составил от 80 до 132 лет в зависимости от месяца и пункта наблюдений с датой окончания 2016—2018 гг.

Таблица 1

Характеристики рядов наблюдений  
за максимальной толщиной льда и среднемесячной температурой воздуха

№ п/п	Индекс	Станция	Температура воздуха		Толщина льда	
			Период наблюдений	Число лет	Период наблюдений	Число лет
1	97048	Пешной	1940—2016	75	1929—2016	67
2	34880	Астрахань	1936—2016	81	1946—2015	57
3	35700	Атырау	1895—2016	119	1944—2015	69
4	37089	о. Тюлений	1959—2016	58	1941—2014	48
5	97039	Лагань	1959—2016	58	1952—2015	19
6	97040	о. Искусственный			1941—2012	49
7	97059	Кулалы, остров	1936—2016	79	1941—2015	54
8	97060	Форт-Шевченко	1882—2016	133	1955—2013	37
9	34691	Новый Уштоган	1951—2016	66	—	—
10	34798	Ганюшкино	1933—2016	83	—	—
11	35514	Карабау	1947—2016	70	—	—
12	35605	Махамбет	1970—2016	47	—	—
13	35715	Кульсары, АМСГ	1968—2016	49	—	—
14	35925	Сам	1947—2016	70	—	—
15	35927	Бейнеу	1949—2016	68	—	—
16	38002	Кызан	1955—2016	62	—	—
17	38008	Тушибек	1955—2016	62	—	—
18	38232	Аккудук	1949—2016	68	—	—
19	97061	Актау	1960—2016	57	—	—
20	34861	Элиста	1936—2016	81	—	—
21	34866	Яшкуль	1933—2016	82	—	—
22	34927	Краснодар	1936—2016	80	—	—
23	34949	Ставрополь	1936—2016	81	—	—
24	37031	Армавир	1932—2016	85	—	—
25	37050	Пятигорск	1891—1997	107	—	—
26	37054	Минеральные Воды	1938—2016	79	—	—
27	37061	Буденовск	1940—2016	73	—	—
28	37470	Дербент	1930—2016	87	—	—
29	37472	Махачкала	1882—2016	122	—	—

**Зависимости между  
максимальной толщиной льда и температурой воздуха**

Для того чтобы определить, какие характеристики температуры воздуха являются определяющими факторами для максимальной толщины льда, были найдены эмпирические зависимости между максимальной толщиной льда и температурой воздуха для каждого пункта наблюдений за льдом. Эти зависимости позволяют не только обосновать исследуемую климатическую характеристику, но при условии,

что они сохранятся и в будущем, дают возможность оценить сценарное изменение максимальной толщины льда при сценарных значениях температуры воздуха.

Наиболее известным метеорологическим фактором, определяющим максимальную толщину льда, является сумма отрицательных значений температуры за зимний период [2—4]; если воспользоваться модулем этой суммы  $|\Sigma T|$ , зависимость будет прямо пропорциональной. С другой стороны, можно представить сумму отрицательных значений температуры как взвешенное среднее среднемесячных значений температуры за месяцы холодного периода года (с октября по март), а весовые коэффициенты определить по уравнению регрессии вида  $H_{\max} = f(T_{10}, T_{11}, T_{12}, T_1, T_2, T_3)$ , где  $H_{\max}$  — максимальная толщина льда за каждый год,  $T_{10}, T_{11}, T_{12}, T_1, T_2, T_3$  — среднемесячные значения температуры воздуха с октября по март. В результате за многолетний период по рядам наблюдений были получены следующие эмпирические зависимости при статистически значимых коэффициентах уравнения регрессии и коэффициентах множественной корреляции ( $R$ ): Атырау

$$H_{\max} = 0,0522|\Sigma T| + 16,07, \quad R = 0,70, \quad n = 69, \quad (1)$$

$$H_{\max} = -1,596T_{10} - 1,086T_{11} - 2,521T_1 - 1,545T_2 + 34,70, \quad R = 0,82; \quad (2)$$

7,7            3,2            77,0        12,0

Кулалы

$$H_{\max} = 0,0573|\Sigma T| + 3,577, \quad R = 0,60, \quad n = 62, \quad (3)$$

$$H_{\max} = -1,711T_{10} - 2,512T_{11} - 2,429T_2 + 34,70, \quad R = 0,76; \quad (4)$$

12,2            66,9        20,9

Пешной

$$H_{\max} = 0,0418|\Sigma T| + 16,385, \quad R = 0,55, \quad n = 68, \quad (5)$$

$$H_{\max} = -1,711T_{10} - 2,512T_{11} + 34,70, \quad R = 0,41; \quad (6)$$

73,7            26,7

Форт-Шевченко

$$H_{\max} = 0,0738|\Sigma T| + 11,083, \quad R = 0,56, \quad n = 43, \quad (7)$$

$$H_{\max} = -2,601T_{10} - 1,944T_{11} + 15,444, \quad R = 0,70; \quad (8)$$

73,7            26,7

Астрахань (при исключении случаев тонкого льда  $H_{\max} < 10$  см)

$$H_{\max} = 0,0417|\Sigma T| + 19,1, \quad R = 0,76, \quad n = 45, \quad (9)$$

$$H_{\max} = -1,896T_1 - 0,652T_2 - 1,540T_2 + 24,51, \quad R = 0,82; \quad (10)$$

64,6            3,8            31,6

Лагань

$$H_{\max} = 0,0417 \left| \sum T \right| + 19,1, \quad R = 0,83, \quad n = 15, \quad (11)$$

где  $R$  — коэффициент корреляции;  $n$  — число лет наблюдений; под каждым уравнением и фактором приведен его вклад (%) в общую сумму квадратов, объясненную уравнением.

Для пункта о. Тюлений эффективных зависимостей не найдено, для пункта о. Искусственный метеоданные отсутствуют, а для пункта Лагань получена только однофакторная зависимость от сумм отрицательных значений температуры, поскольку использование множественной регрессии при малом объеме данных ( $n = 15$ ) неэффективно.

Анализ полученных эмпирических зависимостей (1) — (11) свидетельствует о том, что в большинстве случаев уравнения множественной регрессии были даже эффективнее, чем однофакторные. В уравнения множественной регрессии для пунктов наблюдений казахстанского сектора (восточная и южная части рассматриваемой акватории) либо входят значения температуры воздуха для осенних месяцев (Форт-Шевченко, Пешной), либо добавляются еще значения температуры воздуха за январь и февраль (Атырау, Форт-Шевченко). Для речного пункта в Астрахани в уравнении эффективной является температура воздуха для второй части холодного периода (с января по март).

В общем можно сделать вывод о том, что лучшие из полученных зависимостей достаточно эффективны при  $R > 0,8$ , а в качестве факторов, определяющих максимальную толщину льда, следует рассматривать температуру воздуха за все месяцы холодного периода (с октября по март).

### Анализ климатических изменений максимальной толщины льда

Для исследования применялись как ряды данных, полученных в результате непосредственных наблюдений, так и многолетние ряды, приведенные к многолетнему периоду с восстановлением пропусков. Климатические изменения оценивались по эффективности двух моделей нестационарного среднего (линейный тренд и ступенчатые изменения среднего значения при переходе от одного стационарного периода к другому) по отношению к модели стационарной выборки [13—17]. В качестве показателя эффективности нестационарной модели ( $\Delta$ ) принята относительная разность (%) стандартных отклонений остатков модели стационарной выборки ( $\sigma_0$ ) и нестационарной модели ( $\sigma_{\text{нест}}$ ):

$$\Delta = (\sigma_0 - \sigma_{\text{нест}}) / \sigma_0 \cdot 100 \%. \quad (12)$$

Результаты оценки наличия нестационарности средних значений в виде показателей эффективности для модели линейного тренда ( $\Delta_{\text{тр}}$ ) и ступенчатых изменений ( $\Delta_{\text{ст}}$ ) приведены в табл. 2 для наблюдаемых данных и для рядов, приведенных к многолетнему периоду. В табл. 2 представлены также коэффициент корреляции модели линейного тренда ( $R$ ), объем рядов ( $n$ ) и год ступенчатых изменений среднего ( $T_{\text{ст}}$ ); жирным шрифтом в табл. 2, как и во всех последующих таблицах,

отмечены ситуации  $\Delta > 10\%$  и статистически значимых  $R$  при уровне значимости  $\alpha = 5\%$  [7, 18].

Таблица 2

Результаты оценки эффективности нестационарных моделей  
максимальной толщины льда

Код	Данные наблюдений					Данные, приведенные к многолетнему периоду				
	$\Delta_{тр}$	$\Delta_{ст}$	$T_{ст}$	$R$	$n$	$\Delta_{тр}$	$\Delta_{ст}$	$T_{ст}$	$R$	$n$
34880	<b>11,7</b>	<b>14,3</b>	1989	<b>-0,47</b>	57	<b>11,9</b>	<b>14,3</b>	1989	<b>-0,47</b>	72
35700	<b>15,7</b>	<b>18,2</b>	1978	<b>-0,54</b>	69	<b>14,9</b>	<b>16,4</b>	1978	<b>-0,53</b>	72
37089	0,0	1,5	1971	-0,01	48	0,6	2,5	1991	-0,11	55
97039	3,9	0,0	1971	-0,28	19	10,0	<b>11,8</b>	1980	<b>-0,44</b>	70
97040	4,5	7,5	1980	<b>-0,30</b>	49	2,7	5,8	1980	-0,23	63
97048	<b>28,8</b>	<b>27,6</b>	1980	<b>-0,70</b>	67	<b>25,6</b>	<b>25,2</b>	1980	<b>-0,67</b>	70
97059	<b>30,2</b>	<b>26,0</b>	1990	<b>-0,72</b>	54	<b>30,2</b>	<b>26,0</b>	1990	<b>-0,72</b>	54
97060	5,3	8,2	1978	<b>-0,32</b>	37	5,3	8,2	1978	<b>-0,32</b>	37

Для совместного анализа результатов моделирования и их графического представления были построены графики многолетних колебаний с разделением на периоды квазистационарных средних значений по  $T_{ст}$ , которые приведены на рис. 2.

Из совместного анализа данных, представленных в табл. 2 и на рис. 2, с учетом расположения пунктов наблюдений (см. рис. 1) можно сделать следующие выводы:

— полученные результаты (см. табл. 2) практически не зависят от того, по наблюдаемым или по восстановленным рядам проводилось моделирование, и исключение составляет только ряд в пункте 97039 Лагань, где продолжительность ряда возросла с 19 до 70 лет;

— во всех случаях произошло уменьшение максимальной толщины льда, и, как правило, это уменьшение имело место в виде ступенчатого перехода от одних стационарных условий к другим;

— на морских станциях этот переход к новым условиям датируется, как правило, 1980 годом, а в устье Волги резкое уменьшение максимальной толщины льда произошло несколько позднее — в 1989 г.;

— исключение составляют наблюдения на о. Кулалы, где первое большое уменьшение максимальной толщины льда произошло в 1952 г. (если можно доверять результатам отдельных наблюдений за 1940-е годы), а следующее уменьшение имело место только в 1990 г.;

— на южных станциях (о. Кулалы, Форт-Шевченко) средние значения максимальной толщины льда уже достигли критических 20 см и даже 10 см, при которых лед в отдельные годы может даже не формироваться.

Оценка количественных значений изменения средних значений максимальной толщины льда за два квазистационарных периода ( $\Delta H_{\max\text{ ср}}$ ) дает следующие результаты при сравнении с естественной изменчивостью или средним квадратическим отклонением (СКО):

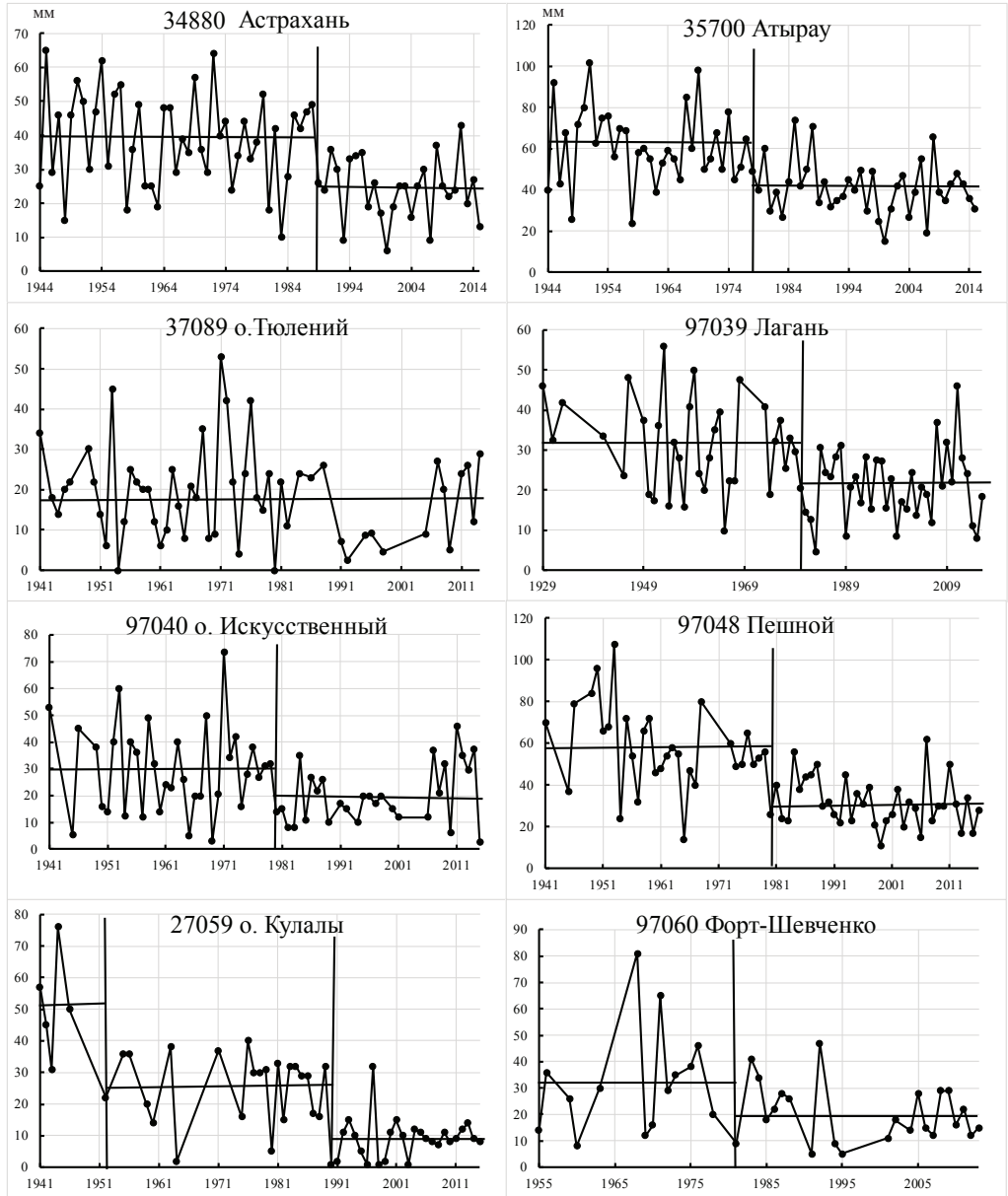


Рис. 2. Многолетние ряды максимальной толщины льда (мм) на Северном Каспии и их аппроксимация стационарными и нестационарными средними.



- устьевая станция Астрахань:  $\Delta H_{\max \text{ ср}} = -14,8$  см при СКО = 14,0 см;
- северо-западные станции на Каспии: о. Тюлений  $\Delta H_{\max \text{ ср}} = -5,1$  см, СКО = 11,5 см; Лагань  $\Delta H_{\max \text{ ср}} = -10,6$  см, СКО = 11,3 см; о. Искусственный  $\Delta H_{\max \text{ ср}} = -9,4$  см, СКО = 14,9 см;
- северо-восточные станции на Каспии: Атырау  $\Delta H_{\max \text{ ср}} = -20,2$  см, СКО = 11,5 см; Пешной  $\Delta H_{\max \text{ ср}} = -27,5$  см, СКО = 20,8 см;
- южные станции на Каспии: Кулалы  $\Delta H_{\max \text{ ср}} = -42,8$  (-16,7) см, СКО = 16,0 см; Форт-Шевченко  $\Delta H_{\max \text{ ср}} = -13,3$  см, СКО = 16,3 см.

Таким образом, наименее восприимчивым к потеплению климата является северо-западный сектор рассматриваемой акватории Каспия, где уменьшение максимальной толщины льда составляет от 5 до 11 см, что меньше естественной изменчивости, и средняя толщина льда пока остается равной примерно 20 см. Наиболее суровые зимние условия наблюдаются в северо-восточном секторе акватории, но там уменьшение толщины льда уже более существенно и превышает естественную изменчивость (правда, пока на 10—30 %). Средняя многолетняя максимальная толщина льда уменьшилась здесь на 20—28 см, но пока еще существенна и составляет 32—41 см. Хотя на южных станциях уменьшение толщины льда и сопоставимо с СКО (если не учитывать аномально толстый лед за период 1941—1944 гг. на станции о. Кулалы), но многолетние средние значения уже уменьшились до 13—17 см. Это свидетельствует об увеличении вероятности полного отсутствия льда в отдельные годы. На речном посту в Астрахани уменьшение максимальной толщины льда лишь немного превышает СКО, но среднее значение уменьшилось существенно: от 39 см до 24 см. В целом же уменьшение средней максимальной толщины льда наблюдается на всех станциях Северного Каспия и составляет от 5 до 28 см.

### Анализ климатических изменений

#### температуры воздуха холодного периода в пунктах ледовых наблюдений

Полученные зависимости (1) — (11) свидетельствуют о том, что основными климатическими факторами, определяющими максимальную толщину льда, являются сумма отрицательных значений температуры воздуха за зимний период и средние значения температуры за отдельные месяцы. При анализе изменений среднемесячных значений температуры можно установить также и месяц, который может отвечать за эти изменения наибольшим образом. Для анализа рассматривались многолетние ряды температуры воздуха в перечисленных выше семи пунктах наблюдений за ледовым режимом (за исключением о. Искусственный, где метеонаблюдения не проводились).

Суммы отрицательных значений температуры за холодный период были рассчитаны на основе среднесуточных значений только для трех станций (Пешной, Кулалы, Форт-Шевченко), где имелись соответствующие данные. Для остальных станций суммы отрицательных значений температуры рассчитывались интерполяцией среднемесячных значений, так как среднесуточные данные отсутствовали за многолетний период. Сопоставление сумм отрицательных значений температуры

по среднесуточным и среднемесячным данным, выполненное для трех станций, дало близкие результаты с коэффициентами корреляции более 0,7.

В связи с тем, что для максимальной толщины льда установлен переход от одного стационарного режима к другому в 1980 г., по этому же году было осуществлено разделение многолетних рядов сумм отрицательных значений температуры и среднемесячной температуры воздуха на две части, после чего был применен критерий Стьюдента для оценки стационарности средних двух частей ряда. В качестве начального года наблюдений был задан 1936 г. — одинаковый для всех пунктов. Также были применены нестационарные модели ступенчатых изменений и линейного тренда для аппроксимации временных рядов.

Результаты оценки стационарности средних значений по критерию Стьюдента, так же как и показатели эффективности нестационарных моделей в виде  $\Delta_{ст}$  и  $R$ , приведены в табл. 3, где St — вывод о принятии (+) или отклонении (–) гипотезы стационарности средних значений при заданном уровне значимости  $\sigma = 5\%$ ,  $\Delta T$  — изменение средних значений температуры (°C) за период до и после 1980 г.

Таблица 3

Результаты оценки стационарности сумм отрицательных значений температуры воздуха и среднемесячной температуры воздуха в пунктах ледовых наблюдений

Код	St	$\Delta_{ст}$	$R$	$\Delta T$	СКО	St	$\Delta_{ст}$	$R$	$\Delta T$	СКО
<i>Суммы</i>						<i>Ноябрь</i>				
34880	-	6,5	<b>-0,35</b>	-171	241	+	4,2	0,18	+0,5	2,4
35700	-	9,6	<b>-0,43</b>	-221	284	+	6,6	<b>0,24</b>	+0,7	2,5
37089	+	3,3	-0,19	-38,5	111	+	3,0	0,15	+0,4	2,1
97039	-	5,1	<b>-0,27</b>	-102	169	+	2,3	0,09	+0,2	2,2
97048	-	<b>10,1</b>	<b>-0,43</b>	-221	276	+	5,1	0,20	+0,7	2,3
97059	-	7,1	<b>-0,35</b>	-129	194	+	4,8	0,22	+0,7	2,1
97060	-	5,8	<b>-0,29</b>	-87,8	149	+	4,2	0,18	+0,5	2,0
<i>Декабрь</i>						<i>Январь</i>				
34880	+	5,2	<b>0,29</b>	+1,2	2,7	-	7,7	<b>0,31</b>	+2,7	3,8
35700	-	5,0	<b>0,28</b>	+1,4	3,2	-	7,3	<b>0,31</b>	+3,2	4,2
37089	+	3,9	0,07	+0,2	1,8	+	3,3	-0,04	+0,8	2,4
97039	+	3,2	-0,06	0	0,2	+	4,1	0,00	+1,1	3,2
97048	+	4,4	<b>0,26</b>	+1,2	3,0	-	7,8	<b>0,30</b>	+2,5	4,0
97059	+	4,5	<b>0,25</b>	+0,9	2,7	-	6,3	<b>0,25</b>	+1,9	3,1
97060	+	5,0	<b>0,26</b>	+1,0	2,5	-	4,9	0,21	+1,6	3,1
<i>Февраль</i>						<i>Март</i>				
34880	+	4,6	<b>0,25</b>	+1,6	4,0	-	<b>12,1</b>	<b>0,44</b>	+1,8	2,6
35700	+	3,9	0,21	+1,7	4,4	-	9,9	<b>0,40</b>	+1,6	3,4
37089	+	4,1	-0,04	0,0	2,5	-	<b>10,2</b>	<b>0,36</b>	+1,1	2,1
97039	+	3,7	0,01	+0,4	3,4	-	<b>12,1</b>	<b>0,40</b>	+1,4	2,4
97048	+	4,1	0,22	+1,8	4,2	-	<b>10,8</b>	<b>0,42</b>	+1,9	3,2
97059	+	4,0	0,22	+1,6	3,4	-	<b>11,3</b>	<b>0,42</b>	+1,7	2,7
97060	+	3,7	0,17	+1,1	3,1	-	<b>10,9</b>	<b>0,41</b>	+1,4	2,4

Как следует из результатов, представленных в табл. 3, суммы отрицательных значений температуры воздуха уменьшаются и это уменьшение статистически значимо по критерию Стьюдента на всех станциях, кроме о. Тюлений. Для среднемесячной температуры практически вся нестационарность в виде повышения средней температуры воздуха имеет место в марте, когда формируется наибольшая толщина льда за зимний период как интегральный показатель последовательного его наращивания. Поэтому если в марте отсутствуют условия для окончательного наращивания льда, то и максимальная его толщина будет меньше. Наиболее стационарной является температура воздуха в ноябре, декабре и феврале. Для отдельных метеостанций нестационарность средней температуры проявляется в разные месяцы. Так, для метеостанции Атырау (северо-восток акватории) нестационарность средней температуры имеет место в течение четырех — пяти месяцев из шести за исключением февраля, если принимать результат по критерию Стьюдента и/или по статистической значимости коэффициента корреляции тренда. При этом на расположенной рядом станции Пешной нестационарность отмечается только в январе и марте. Нестационарность температуры воздуха в Астрахани также имеет место в течение трех — пяти месяцев. На остальных станциях нестационарность температуры имеет место в течение двух — трех месяцев.

Однако для всех станций уменьшение сумм отрицательных значений температуры воздуха и приrost средней температуры во все месяцы ( $\Delta T$ ) не превышает естественной изменчивости (СКО), и даже для сумм отрицательных значений температуры и средней температуры за март в среднем приrost составляет всего 0,6 СКО при отдельных максимумах 0,71—0,78 СКО.

В результате анализа данных о характеристиках температуры воздуха в пунктах измерения толщины льда можно сделать два основных вывода:

— сумма отрицательных значений температуры за холодный период уменьшается повсеместно, но, прежде всего, на станциях северо-востока акватории, где и происходит наиболее существенное уменьшение максимальной толщины льда;

— из всех месяцев холодного периода года (октябрь — март) наиболее существенное повышение температуры воздуха имеет место только в марте, когда и формируется интегральное значение максимальной толщины льда.

### **Анализ климатических изменений температуры воздуха холодного периода в районе Северного и Центрального Каспия**

Рассмотренных выше семи пунктов наблюдений за температурой воздуха, в которых измерялась также толщина льда, явно недостаточно, чтобы понять, как изменяются климатические условия в районе Северного и Центрального Каспия. Поэтому был проведен фоновый анализ климатических изменений температуры воздуха за холодный период года с привлечением данных по всем 29 метеостанциям, представленных на рис. 1. Так же как и для максимальной толщины льда, были применены аппроксимации двумя моделями нестационарного среднего для многолетних рядов, начинавшихся с 1936 г., т.е. рассматривались климатические

изменения за последние 80 лет. Результаты для сумм отрицательных значений температуры воздуха представлены в табл. 4, из которой следует, что коэффициенты корреляции линейного тренда статистически значимы практически для всех рядов (21 ряд из 28) за исключением северокавказских метеостанций, находящихся к востоку от Каспийского моря (Ставрополь, Пятигорск, Минеральные Воды, Буденовск, Дербент, Махачкала), где зимы неустойчивы. Кроме того, во всех случаях эти коэффициенты отрицательны, что свидетельствует об уменьшении сумм отрицательных значений температуры и более теплых зимах.

Таблица 4

Результаты оценки эффективности нестационарных моделей сумм отрицательных значений температуры воздуха

Код	$\Delta_{тр}$	$\Delta_{ст}$	$T_{ст}$	$R$	$n$	Код	$\Delta_{тр}$	$\Delta_{ст}$	$T_{ст}$	$R$	$n$
34691	9,9	10	1980	<b>-0,43</b>	80	37031	4,9	4,8	1978	<b>-0,31</b>	80
34798	6,3	6,6	1980	<b>-0,35</b>	80	37050	0	0,7	1963	0,01	59
34861	5,9	6,3	1988	<b>-0,34</b>	79	37054	2	4,2	1998	-0,2	79
34866	5,7	6,7	1988	<b>-0,33</b>	78	37061	1	2	1998	-0,14	73
34880	6,5	6,5	1980	<b>-0,35</b>	80	37089	1,8	3,3	1977	-0,19	58
34927	5,2	5,6	1954	<b>-0,32</b>	79	37470	1,2	4,1	1977	-0,16	81
34949	1	2,5	1998	-0,14	80	37472	1,4	3,7	1977	-0,16	67
97039	3,7	5,1	1998	<b>-0,27</b>	57	38002	5,4	6,8	1980	<b>-0,32</b>	80
35514	<b>11,4</b>	<b>11</b>	1978	<b>-0,46</b>	80	38008	3,9	5,1	1980	<b>-0,28</b>	80
35605	<b>10,8</b>	<b>10,9</b>	1980	<b>-0,45</b>	80	38232	3	5,3	1980	<b>-0,24</b>	79
35700	9,9	9,6	1980	<b>-0,43</b>	80	97048	9,7	<b>10,1</b>	1980	<b>-0,43</b>	80
35715	9,7	9,7	1978	<b>-0,43</b>	80	97059	6,4	7,1	1980	<b>-0,35</b>	80
35925	4,1	5,2	1978	<b>-0,28</b>	80	97060	4,3	5,8	1980	<b>-0,29</b>	80
35927	4,5	5,7	1980	<b>-0,3</b>	80	97061	3,9	6,3	1980	<b>-0,28</b>	80

Вместе с тем модель ступенчатых изменений эффективна (при  $\Delta > 10\%$ ) в трех случаях, а модель линейного тренда — всего в двух случаях и при этом ненамного превышает 10%. Также интересно отметить, что годом резкого уменьшения сумм отрицательных значений температуры воздуха в 16 случаях из 21 (76%) со статистически значимыми коэффициентами корреляции модели линейного тренда является 1980 г., т.е. тот же, что и для максимальной толщины льда.

Для температуры воздуха самого нестационарного месяца — марта — модель ступенчатых изменений эффективна в 23 случаях из 28 (82%), а модель линейного тренда — в 13 случаях из 28 (46%), что подтверждает полученный ранее вывод о том, что нестационарность проявляется в виде ступенчатых переходов от одних стационарных условий к другим. Также получено, что годы ступенчатых изменений группируются в интервалах 1988—1989 и 1997—2000 гг. Метеостанции, для которых 1988 г. является годом ступенчатого повышения температуры воздуха за март, расположены в западной части рассматриваемой территории, а те, для которых таким годом является 1999 г., — в восточной части, и линия раздела идет по метеостанциям (с юго-запада на северо-восток) Махачкала, Кызан,

Пешной, Махамбет и Карабау (см. рис. 1). Примеры временных рядов со ступенчатым изменением среднего значения в разные годы (1988 и 1999 гг.) приведены на рис. 3.

По полученным годам ступенчатого повышения температуры воздуха (1988 и 1999 гг.) было осуществлено разделение временных рядов на две подвыборки, для каждой из которых были рассчитаны средние и определена их разность ( $\Delta T$ ). При оценке по критерию Стьюдента во всех случаях получен вывод о нестационарности средних значений температуры за два полупериода при уровне значимости  $\alpha = 1\%$ . Результаты картирования разности  $\Delta T$  представлены на рис. 4, где также проведена линия, разделяющая территорию на подрайоны с двумя разными датами ступенчатого повышения температуры.

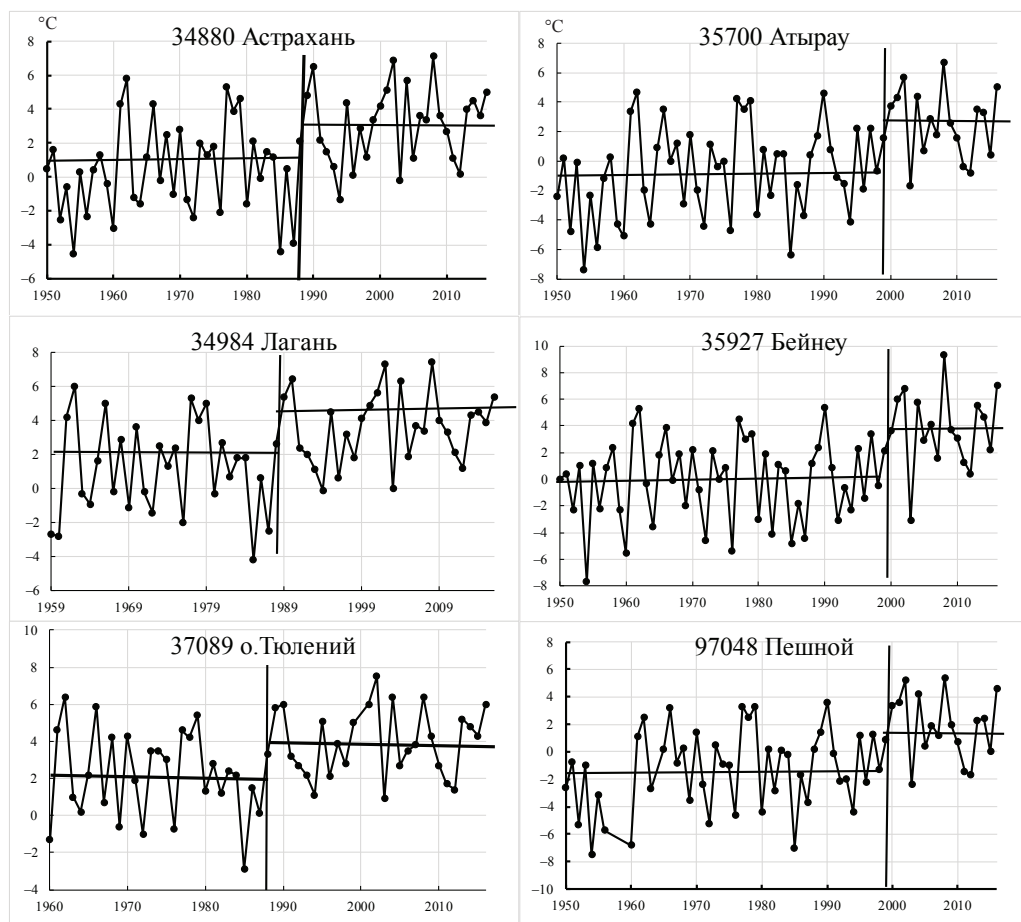


Рис. 3. Временные ряды средней температуры воздуха ( $^{\circ}\text{C}$ ) за март и их аппроксимация моделью ступенчатых изменений с повышением температуры в 1988 г. (слева) и в 1999 г. (справа).

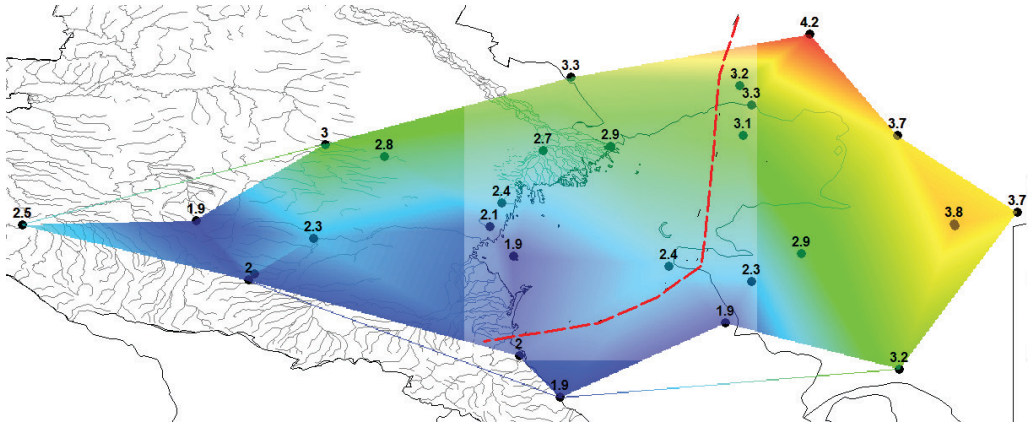


Рис. 4. Прирост средней многолетней температуры воздуха за март ( $\Delta T$  °C).

Штриховая кривая — граница районов с разными датами ступенчатого повышения температуры.

Как следует из пространственного распределения, наибольшее изменение средней многолетней температуры воздуха за март отмечается в северо-восточной и восточной частях территории, где  $\Delta T = 3 \dots 4$  °C. В северо-западной части изменение составляет около 3 °C, а наименьшее повышение наблюдается на юге и юго-западе — около 2 °C.

Вместе с тем естественная изменчивость температуры воздуха различается, поэтому если сравнить выявленные изменения с СКО, то они во всех случаях будут составлять примерно 1 СКО (0,8—1,2 СКО), т.е. будут не столь значительными.

Для остальных месяцев холодного периода года получены практически такие же результаты, как и по данным семи метеостанций, т.е. число нестационарных временных рядов существенно меньше, чем в марте. Так, наиболее нестационарная температура воздуха за октябрь фиксируется только в четырех случаях  $\Delta_{ст} > 10\%$  ( $\Delta_{пр}$  всегда  $< 10\%$ ) и в 13 случаях статистически значимы коэффициенты  $R$  при их предельных значениях  $R_{макс} = 0,37 \dots 0,38$ . В остальные месяцы временные ряды с  $\Delta_{ст} > 10\%$  и  $\Delta_{пр} > 10\%$  отсутствуют, а число статистически значимых коэффициентов  $R$  варьирует от 1—4 в декабре и ноябре до 11—12 в январе и феврале при  $R_{макс} = 0,28 \dots 0,30$ .

Таким образом, территориальный анализ стационарности среднемесячной температуры воздуха за холодный период года в районе Северного и Центрального Каспия свидетельствует о том, что основное повышение температуры происходит только в марте, причем находится в пределах стандарта естественной изменчивости. При этом получен интересный вывод о том, что повышение средней температуры произошел ступенчато в два разных года для разных частей рассматриваемой территории: в 1988 г. для западной части и в 1999 г. для восточной части, что, видимо, связано с особенностями преобладающей атмосферной циркуляции над каждым из этих районов. Так, западная часть рассматриваемой территории находится в основном под воздействием воздушных масс с Атлантического океана.

При этом, как показано в ряде работ, увеличение индекса Северо-Атлантического колебания (САК) произошло именно в 1988 г., причем наиболее значимое было отмечено в марте [17, 19]. Восточная же часть территории находится под влиянием воздушных масс с Азиатского материка, поэтому здесь изменение температурного режима произошло позднее — примерно около 2000 г.

### Заключение

Из проведенного исследования климатических изменений максимальной толщины льда на севере Каспийского моря и определяющих их факторов можно сделать следующие основные выводы:

— основным климатическим фактором, определяющим изменение максимальной толщины льда, помимо сумм отрицательных значений температуры воздуха, являются также и средние значения температуры воздуха за отдельные месяцы холодного периода года, что представлено полученными эффективными эмпирическими зависимостями для отдельных станций;

— максимальная толщина льда за рассмотренный период (с 1940—1950-х годов по 2016 г.) уменьшилась во всех пунктах наблюдений, но больше всего на северо-востоке (на 20—28 см) и юге (на 13—17 см), причем на юге увеличилась вероятность безледных условий, а северо-западная часть пока остается наиболее устойчивой к климатическим изменениям;

— сумма отрицательных значений температуры воздуха уменьшилась как в пунктах ледовых наблюдений, так и в окрестностях Каспийского моря, но изменения происходили с разной интенсивностью: наиболее велики они были в восточной части и меньше в западной, причем ступенчатое уменьшение сумм отрицательных значений температуры, как и уменьшение максимальной толщины льда, относится к 1980 г.;

— средняя температура воздуха за март является самой нестационарной из всех средних величин за остальные зимние месяцы и, так же как и сумма отрицательных значений температуры, определяет уменьшение максимальной толщины льда;

— получено, что ступенчатое уменьшение максимальной толщины льда произошло в основном в 1980 г., так же как и ступенчатое уменьшение сумм отрицательных значений температуры воздуха, а ступенчатое повышение средней температуры за март — в 1988 г. и даже в конце 1990-х годов на станциях северо-востока, что связано с изменениями атмосферной циркуляции в данном регионе.

### Список литературы

1. Болгов М.В., Красножон Г.Ф., Любушин А.А. Каспийское море: экстремальные гидрологические события. М.: Наука, 2007. 381 с.
2. Бухарицин П.И. Расчет и прогноз толщины наслоенного льда в судоходных районах северо-западной части Каспийского моря // Метеорология и гидрология. 1986. № 4. С. 87—93.
3. Бухарицин П.И. Особенности процессов торошения ледяного покрова северной части Каспийского моря // Водные ресурсы. 1984. № 6. С. 115—123.
4. Бухарицин П.И. Особенности ледового режима и методы прогноза ледовых условий северной части Каспийского моря / Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Л.: изд-во ААНИИ, 1986. 20 с.

5. Гидрометеорология и гидрохимия морей. Т. VI. Каспийское море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия. СПб: Гидрометеоиздат, 1992. 359 с.
6. *Думанская И.О.* Ледовые условия морей Европейской части России. М.: изд. Гидрометцентра России, 2014. 608 с.
7. *Закс Л.* Статистическое оценивание. М.: Статистика, 1976. 598 с.
8. *Ивкина Н.И., Наурузбаева Ж.К.* Изменение характеристик ледового режима казахстанской части Каспийского моря в связи с изменением климата // Гидрометеорология и экология. 2015. № 2. С. 28—35.
9. *Ивкина Н.И., Наурузбаева Ж.К., Саиров С.Б.* Экстремально холодные зимние периоды на Казах-станской части Каспийского моря за последние десятилетия / В сб.: Водные ресурсы Централь-ной Азии и их использование. Материалы научно-практической конференции, посвященной подведению итогов объявленного ООН десятилетия «Вода для жизни». Алматы, 22—24 сентя-бря 2016 года. Книга 2. М.: изд-во Института географии, 2016. С. 394—400.
10. *Ивкина Н.И., Наурузбаева Ж.К., Клове Б.* Влияние изменения климатических условий на ледо-вый режим Каспийского моря, 2017. 15 с. [ <http://www.water-ca.org/article/2589> ]
11. Исследования льдов южных морей СССР / Под. ред. К.К. Гюль, С.И. Кан, В.Л. Цурикова. М.: Наука, 1973. 58 с.
12. *Лобанов В.А., Смирнов И.А., Шадурский А.Е.* Практикум по климатологии (учебное пособие). Часть 1. СПб: изд-во РГГМУ, 2011. 144 с.
13. *Лобанов В.А., Шадурский А.Е.* Применение эмпирико-статистических методов для моделиро-вания и анализа климатических изменений // Ученые записки РГГМУ. 2010. № 14. С. 73—88.
14. *Лобанов В.А., Смирнов И.А., Шадурский А.Е.* Практикум по климатологии (учебное пособие). Часть 2. СПб: изд-во РГГМУ, 2012. 141 с.
15. *Лобанов В.А.* Лекции по климатологии. Часть 2. Динамика климата. Кн.1. СПб: изд-во РГГМУ, 2016. 332 с.
16. *Лобанов В.А.* Лекции по климатологии. Часть 2. Динамика климата. Кн. 2. СПб: изд-во РГГМУ, 2018. 377 с.
17. *Лобанов В.А., Тоцакова Г.Г.* Особенности и причины современных климатических изменений в России // Географический вестник. 2016. № 3 (38). С. 79—89.
18. *Малинин В.Н.* Статистические методы анализа гидрометеорологической информации. СПб: изд-во РГГМУ, 2008. 408 с.
19. *Нестеров Е.С.* Североатлантическое колебание: атмосфера и океан. М.: ТРИАДА ЛДТ, 2013. 144 с.
20. Обобщающий доклад. Вклад Рабочих групп I, II и III в Пятый оценочный доклад Межправительственной группы экспертов по изменению климата / Под. ред. Р.К. Пачаури и Л.А. Мейер. МГЭИК, Женева, Швейцария, 2014. 163 с.
21. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. СП 33-101-2003. М.: Госстрой России, 2004. 3 с.
22. *Панин Г.Н., Мамедов Р.М., Митрофанов И.В.* Современное состояние Каспийского моря. М.: Наука, 2005. 356 с.
23. Справочно-аналитический обзор гидрологического режима устьевых областей рек Волги, Тере-ка, Сулака. М.: изд-во ГОИН, 2016. 74 с.
24. Третье и четвертое Национальное сообщение Республики Казахстан к Рамочной Конвенции ООН об изменении климата (РКИК ООН). Астана, 2013. 274 с. [[http://unfccc.int/national\\_reports/nonannex\\_i\\_natcom/submitted\\_natcom/items/653.php](http://unfccc.int/national_reports/nonannex_i_natcom/submitted_natcom/items/653.php)]
25. Третье национальное сообщение Кыргызской Республики к Рамочной конвенции ООН об из-менении климата. Бишкек: ОсОО «Эль Элион», 2016. 274 с. [[http://unfccc.int/national\\_reports/nonannex\\_i\\_natcom/submitted\\_natcom/items/653.php](http://unfccc.int/national_reports/nonannex_i_natcom/submitted_natcom/items/653.php)]
26. Третье Национальное сообщение Республики Узбекистан по Рамочной Конвенции ООН об из-менении климата. Ташкент, 2016. 220 с. [[http://unfccc.int/national\\_reports/nonannex\\_i\\_natcom/submitted\\_natcom/items/653.php](http://unfccc.int/national_reports/nonannex_i_natcom/submitted_natcom/items/653.php)]
27. Третье Национальное сообщение Туркменистана по Рамочной Конвенции ООН об изменении климата. Ашхабад, 2015. 160 с. [[http://unfccc.int/national\\_reports/nonannex\\_i\\_natcom/submitted\\_natcom/items/653.php](http://unfccc.int/national_reports/nonannex_i_natcom/submitted_natcom/items/653.php)]
28. Третье национальное сообщение Республики Таджикистан по Рамочной конвенции об ООН изменении климата. Душанбе, 2014. 167 с. [[http://unfccc.int/national\\_reports/nonannex\\_i\\_natcom/submitted\\_natcom/items/653.php](http://unfccc.int/national_reports/nonannex_i_natcom/submitted_natcom/items/653.php)]
29. *Утешев А.С.* Климат Казахстана. Л.: Гидрометиздат, 1959. 232 с.