

ТЕНДЕНЦИИ МНОГОЛЕТНЕЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ УРОВНЯ МОРЯ НА ПРИБРЕЖНЫХ СТАНЦИЯХ СЕВЕРНОГО ЛЕДОВИТОГО ОКЕАНА

В.А. МЕРКУЛОВ, И.М. АШИК, Л.А. ТИМОХОВ

ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, e-mail: ltim@aari.ru

В результате анализа данных многолетних наблюдений за колебаниями уровня моря на станциях морей Северного Ледовитого океана получены новые оценки линейных трендов изменений положения уровенной поверхности. Практически на всех станциях, за исключением станции Баренцбург, наблюдается повышение уровня моря. В многолетнем ходе колебаний уровня выделены периоды, характеризующиеся различными значениями линейных трендов. Проанализированы причины изменчивости локальных линейных трендов уровня арктических морей от стадии 1950–1980 к стадии 1990–2015 гг. Показано, что наличие локальных трендов в ходе среднегодовых уровней на береговых станциях является следствием изменения климатических условий, отражающихся в изменениях атмосферных и гидросферных климатических индексов, а также пресноводном стоке рек.

Ключевые слова: Северный Ледовитый океан, уровень моря, береговые станции, линейные тренды уровня, стадии многолетних колебаний уровня.

ВВЕДЕНИЕ

Уровенная поверхность океана формируется под воздействием как гидрометеорологических процессов, так и космогеофизических сил. Поэтому уровень океана является важнейшим индикатором состояния океанической системы и отражает в целом состояние климата. Роль геолого-геодинамических процессов в межгодовых изменениях уровня на масштабах десятилетий незначительна. В период быстрых изменений климата Арктики изучение тенденций изменчивости уровня моря на береговых станциях Северного Ледовитого океана и установление причин его многолетних колебаний является актуальной задачей, имеющей научное и практическое значение.

Установлено, что многолетняя изменчивость многих гидрометеорологических процессов в системе атмосфера — лед — океан имеет свои, отдельные для каждого параметра, тенденции. При этом нельзя отрицать, что изменчивость любой характеристики дает некоторое влияние на другие процессы, происходящие во всей этой системе. Рассматривая изменчивость атмосферных процессов в Арктике на протяжении всего периода исследований, можно увидеть, что в их изменениях есть четкая тенденция. Как показано в работе (Александров, Радионов, 2017), в течение 1936–2016 гг. наблюдается статистически значимый (на 5 %-ном уровне значимости) положительный линейный тренд среднегодовой температуры воздуха для широтных зон 60–70 и 70–85° с.ш. и в целом для северной полярной области. Линейное (по тренду) повышение температуры

воздуха за 81 год составило 1,38, 1,46 и 1,38 °С соответственно. Значимый тренд среднегодовой температуры воздуха прослеживается для всех климатических районов, кроме Западно-Сибирского. В этой же работе приведены тренды многолетней изменчивости осадков над арктической зоной, которые также являются значимыми.

Если обратиться к другому источнику (Фролов, Гудкович, 2007), то можно обнаружить, что точно такие же значимые изменения, правда, с отрицательной тенденцией, претерпевают многолетние вариации ледовитости арктических морей. В Гренландском, Баренцевом и Карском морях величина линейного тренда для изменений площади ледяного покрова в период с 1900 по 2002 г. достигает –5,095 тыс. км²/год. В морях Лаптевых, Восточно-Сибирском и Чукотском величина тренда несколько ниже — –1,214 тыс. км²/год, но при этом тренд остается значимым.

Приняв во внимание тот факт, что перечисленные выше характеристики в течение многих лет претерпевали существенную линейную изменчивость, нужно понимать, что такие же изменения будут происходить и с уровенной поверхностью. Но здесь необходимо учесть, что многолетние тенденции изменения уровня моря, наблюдаемые на береговых станциях, в основном обусловлены двумя факторами: вертикальными движениями земной коры и климатическими изменениями состояния атмосферы и гидросферы (Ашик, 2011). Таким образом, средний уровень станций арктических морей будет не только повышаться за счет климатических изменений, но и претерпевать какие-либо изменения за счет вертикальных движений земной коры. И тут, в зависимости от скорости изостатических движений, этот фактор будет или не проявляться никак, или давать какой-то определенный вклад, или же полностью перекрывать влияние гидрометеорологических факторов. То есть, в зависимости от знака трендовой составляющей того или иного ряда данных уровня, можно говорить о вкладе геологической или климатической составляющей в изменчивость уровня.

Измерения уровня моря на прибрежных станциях евразийской части Северного Ледовитого океана выполняются с середины прошлого столетия по сегодняшний день. За это время были накоплены довольно большие ряды данных о колебаниях уровня моря в различных районах морей Северного Ледовитого океана. Наличие такого объема данных позволяет рассмотреть внутреннюю структуру имеющихся временных рядов уровня и проанализировать все найденные в них закономерности. Также, имея довольно большие ряды данных, есть смысл исследовать долгопериодную изменчивость многолетнего уровня, а точнее — его трендовую составляющую.

ДАННЫЕ НАБЛЮДЕНИЙ

Станции, на которых имеются многолетние ряды наблюдений за колебаниями уровня моря, начиная с середины XX века до наших лет, отмечены на рис. 1. Как видно из рисунка, береговые станции уровенных наблюдений охватывают весь евразийский прибрежный и шельфовый бассейн Арктики, от скандинавского побережья (Олесунн) до Чукотского полуострова (п. Певек). На них в течение примерно 60 лет производились регулярные измерения уровня моря.

В табл. 1 указаны координаты станций и периоды наблюдений. Для анализа многолетней изменчивости уровня имеющиеся среднемесячные данные были приведены к среднегодовым значениям, полученным путем осреднения за соответствующий период. Непременным условием при этом является приведение этих наблюдений к одному горизонту путем вычитания из натурных данных среднемноголетнего значения уровня, отличного для каждой станции.

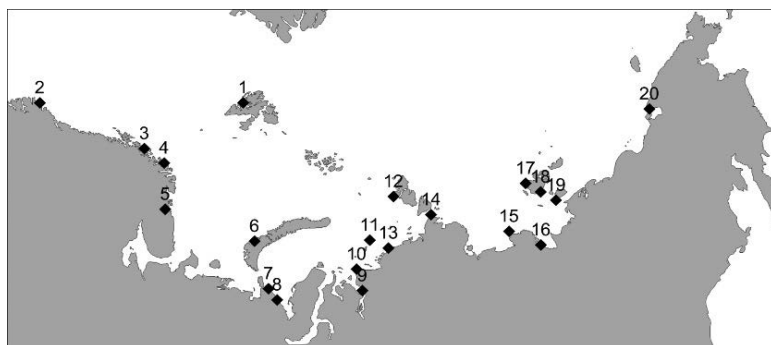


Рис. 1. Расположение береговых гидрометеорологических станций Северного Ледовитого океана, на которых выполняются уровенные наблюдения в период с начала 1950-х гг. до 2010–2015 гг.

Таблица 1

**Станции, на которых ведутся регулярные измерения уровня моря
с середины XX в. по 2010–2015 гг.**

№	Станция	Район	Координаты	Период, годы
1	Баренцбург	Гренландское море	78,07° с.ш., 14,25° в.д.	1950–2015
2	Олесунн	Норвежское море	62,47° с.ш., 06,15° в.д.	1951–2015
3	Тромсё		69,65° с.ш., 18,96° в.д.	1952–2015
4	Хаммерфест		70,66° с.ш., 23,68° в.д.	1957–2015
5	Мурманск	Баренцево море	68,97° с.ш., 33,05° в.д.	1952–2015
6	Малые Кармакулы		72,37° с.ш., 52,70° в.д.	1950–2015
7	Амдерма	Карское море	69,75° с.ш., 61,70° в.д.	1950–2015
8	Усть-Кара		69,15° с.ш., 64,31° в.д.	1950–2015
9	Сопочная Карга		71,87° с.ш., 82,70° в.д.	1958–2015
10	О. Диксон		73,50° с.ш., 80,40° в.д.	1950–2015
11	О-ва Известий ЦИК		75,95° с.ш., 82,95° в.д.	1954–2015
12	О. Голомянный		79,55° с.ш., 90,67° в.д.	1955–2012
13	Мыс Стерлегова		75,42° с.ш., 88,90° в.д.	1950–2015
14	ГМО им. Е.К. Федорова (бывш. Мыс Челюскина)		77,72° с.ш., 104,30° в.д.	1950–2010
15	О-ва Дунай	Море Лаптевых	73,93° с.ш., 124,50° в.д.	1951–2011
16	Тикси		71,63° с.ш., 128,88° в.д.	1950–2010
17	О. Котельный		76,00° с.ш., 137,87° в.д.	1951–2015
18	Пр. Санникова		74,67° с.ш., 138,90° в.д.	1950–2015
19	М. Кигилях		73,33° с.ш., 139,87° в.д.	1951–2015
20	Певек	Восточно-Сибирское море	69,70° с.ш., 170,25° в.д.	1950–2011

В результате было получено 20 временных серий аномалий среднегодовых значений уровня для указанных станций. В качестве метода исследования привлекался статистический анализ.

ТЕНДЕНЦИИ ИЗМЕНЕНИЯ УРОВНЯ МОРЯ

В межгодовых колебаниях уровня моря на всех исследуемых станциях выделяются тенденции и межгодовые флуктуации уровня. В качестве характеристики тенденции изменения уровня нами использован линейный тренд временного ряда. Рассчитанные характеристики линейных трендов, приведенные в табл. 2, показали,

что на многих прибрежных станциях Арктического бассейна тенденция изменения уровня поверхности положительная и значимая. Величина тренда на этих станциях колеблется от 1,32 до 4,61 мм/год, а в среднем составляет 2,4 мм/год. В большинстве случаев подъем земной коры не имеет существенного влияния на изменчивость уровня в прибрежной зоне арктических морей. Но расчеты показывают, что присутствуют исключения: на всех станциях скандинавского побережья, а также на станциях Известий ЦИК, Голомянный и Кигилях в изменчивости уровня наблюдается практически нулевой линейный тренд (около 0,45 мм/год). Предположительно на этих станциях происходит наложение двух основных факторов друг на друга, и тем самым какой-либо явной изменчивости в характеристиках на протяжении многолетнего периода не происходит. Однако стоит отметить, что, по расчетам (Ашик, Павлов, 2008), на станциях скандинавского побережья в изменчивости уровня наблюдался отрицательный тренд. Эти расчеты проводились для рядов с периодом до 2004 г. То есть за десять лет знак трендовой составляющей уровня моря для станций скандинавского побережья изменился с отрицательного на положительный, и таким образом можно судить о том, что в последние годы влияние гидрометеорологических факторов на этих станциях несколько значительнее, чем геологических.

Отдельно стоит отметить изменения положения среднего уровня на станции Баренцбург. Здесь на протяжении всего периода измерений наблюдается довольно высокий отрицательный тренд (–2,79 мм/год). На архипелаге Шпицберген происходит очень быстрый подъем земной коры и невозможно проследить влияние гидрометеорологических факторов на долгопериодную составляющую. Причем отрицательный знак тренда здесь сохраняется на протяжении всего периода исследований. По расчетам (Ашик, Павлов, 2008), подобные результаты имеют место еще на нескольких станциях Северо-Европейского бассейна Северного Ледовитого океана: Буде, Нарвик, Эвенскьяер, им. Кренкеля и др. Такие же отрицательные тренды присутствуют и на некоторых сибирских станциях: мыс Желания, Косистый (Pavlov, 2001). Несколько другая картина наблюдается на станции Котельный: здесь, наоборот, происходит постоянный и довольно существенный подъем уровня с величиной тренда 4,61 мм/год. Дело в том, что в районе данной станции происходит разрушение берега с интенсивностью до 1,5 м в год, образуя уступные места галечной волноприбойной полосы с многочисленными прибрежными лагунами (Ежегодные данные о режиме и качестве вод морей и морских устьев рек, 2015). Таким образом, именно геологический фактор дает основной вклад в многолетнюю изменчивость уровня на станции Котельный.

СТАДИИ МНОГОЛЕТНИХ КОЛЕБАНИЙ УРОВНЯ

В работе (Ашик, 2011) было показано, что в большинстве районов арктических морей наблюдается различие уровня режима в периоды до 80-х гг. XX в. и после. Локальные линейные тренды, рассчитанные для этих двух периодов, демонстрируют для большинства станций различные тенденции. В настоящей работе на расширенной базе данных приводятся новые оценки величин локальных линейных трендов. Величина линейного тренда в период после 1985 г. выросла в среднем на 1–6 мм/год, по сравнению с периодом до 1985 г. И это не может являться какой-либо инструментальной ошибкой, так как данный феномен замечен практически на всех уровнях постах арктических морей, плюс подобная тенденция прослеживается и в изменчивости других гидрометеорологических характеристик, в частности — температуры воздуха (Александров, Радионов, 2017) и ледовитости морей (Фролов, Гудкович, 2007).

**Величина линейного тренда уровня для разных периодов
и характеристика стационарности рядов на арктических станциях**

Станция	Величина тренда за весь период, мм/год	Величина тренда до 1980-х гг., мм/год	Величина тренда после 1980-х гг., мм/год	Стационарность ряда*	Амплитуда средних значений уровня, см
Баренцбург	-2,79	-2,28	-2,08	нет	10,00
Олесунн	0,86	0,14	0,00	да	3,98
Тромсё	0,07	-1,77	-0,36	да	0,90
Хаммерфест	0,66	-0,88	-0,46	да	3,50
Мурманск	2,54	-3,19	2,68	нет	10,43
Малые Кармакулы	2,11	-1,27	3,09	нет	8,50
Амдерма	3,85	0,90	4,22	нет	15,71
Усть-Кара	2,18	0,00	4,03	нет	9,74
Сопочная Карга	2,29	-1,10	0,46	нет	9,45
О. Диксон	2,03	0,00	0,50	нет	9,32
О-ва Известий ЦИК	0,25	0,00	0,00	да	0,90
О. Голомянный	0,32	0,25	-1,31	да	1,65
Мыс Стерлегова	1,41	0,68	-2,84	нет	6,94
ГМО им. Е.К. Федорова (бывш. Мыс Челюскина)	1,86	1,09	-1,76	нет	9,26
О-ва Дунай	2,33	0,35	2,27	нет	9,14
Тикси	1,72	0,24	2,07	нет	7,00
О. Котельный	4,61	4,73	4,30	нет	15,56
Пр. Санникова	1,32	-0,33	0,20	нет	6,39
М. Кигилях	0,39	-0,85	-1,38	да	3,41
Певек	2,67	0,62	1,34	нет	11,60

Примечание: * — «да» — ряд стационарен; «нет» — ряд нестационарен (Гордеева, 2010).

К данному моменту накоплено достаточно данных, чтобы не только оценить трендовые составляющие рассматриваемых периодов, но и произвести проверку стационарности имеющихся рядов. Такие расчеты явно помогут произвести более полную и точную оценку многолетней изменчивости уровня. Все величины трендов, а также оценки стационарности рядов представлены в табл. 2.

Анализ результатов показывает, что на протяжении всего периода измерений изменчивость уровня моря в разных частях Арктического бассейна имела различный характер (см. рис. 2, 3). Причем здесь сложно произвести какое-либо четкое пространственное районирование по тому или иному типу изменчивости. В целом, опираясь на полученные данные, все станции можно разделить на 4 отдельные группы.

I группа

Сюда входят две станции, многолетняя изменчивость уровня на которых в полной мере зависит от геологического фактора. Это станции Баренцбург и о. Котельный, что уже отмечалось ранее в данной статье.

II группа

Это станции, на которых в рядах многолетней изменчивости уровня моря не наблюдается явной нестационарности. При этом тренды, как в первый, так и во второй период, могут вести себя различным образом. К этой группе относятся все станции скандинавского побережья, станции северной части Карского моря (о-ва Известий ЦИК, о. Голомянный), а также станция м. Кигилях. Рассматривая кусочные тренды для каждого периода на каждой из этих станций, можно заметить, что практически

на всех станциях они или отрицательные, или же нулевые. При этом общий тренд на каждой станции имеет положительный знак, пусть он и не значим. Таким образом, на данных станциях уровень изменяется за счет поднятия земной коры, правда не такого интенсивного, как в Баренцбурге. А общий положительный тренд наблюдается именно по той причине, что в 1980-е гг. здесь, как и на других станциях, произошел резкий подъем уровня, связанный с гидрометеорологическими факторами. Это подтверждается тем, что разность между средними значениями уровня во втором и первом периоде везде положительна и довольно высока: в среднем для станций в Норвежском море — 2,79 см, в Карском море — 1,28 см, на станции м. Кигилях — 3,41 см. Но подобная разница между средними значениями двух частей ряда, при имеющейся длине выборки, не позволяет называть эти ряды нестационарными.

III группа

Здесь представлены станции с отрицательным или с нулевым трендом уровня в первом периоде и с явным высоким положительным трендом во втором периоде. В среднем на этих станциях величина линейного тренда уровня в первый период

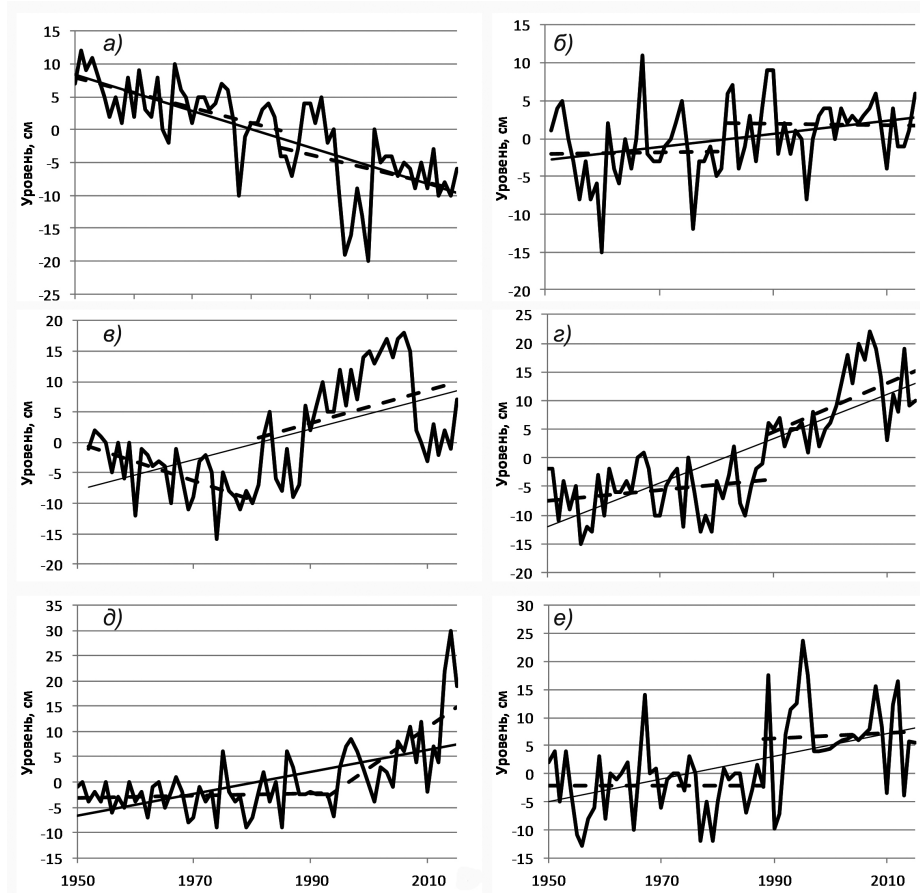


Рис. 2. Аномалии многолетнего хода уровня на станциях: а) — Баренцбург; б) — Олесунн; в) — Мурманск; г) — Амдерма; д) — Усть-Кара; е) — о. Диксон. Прямые линии представлены линейные тренды для разных периодов.

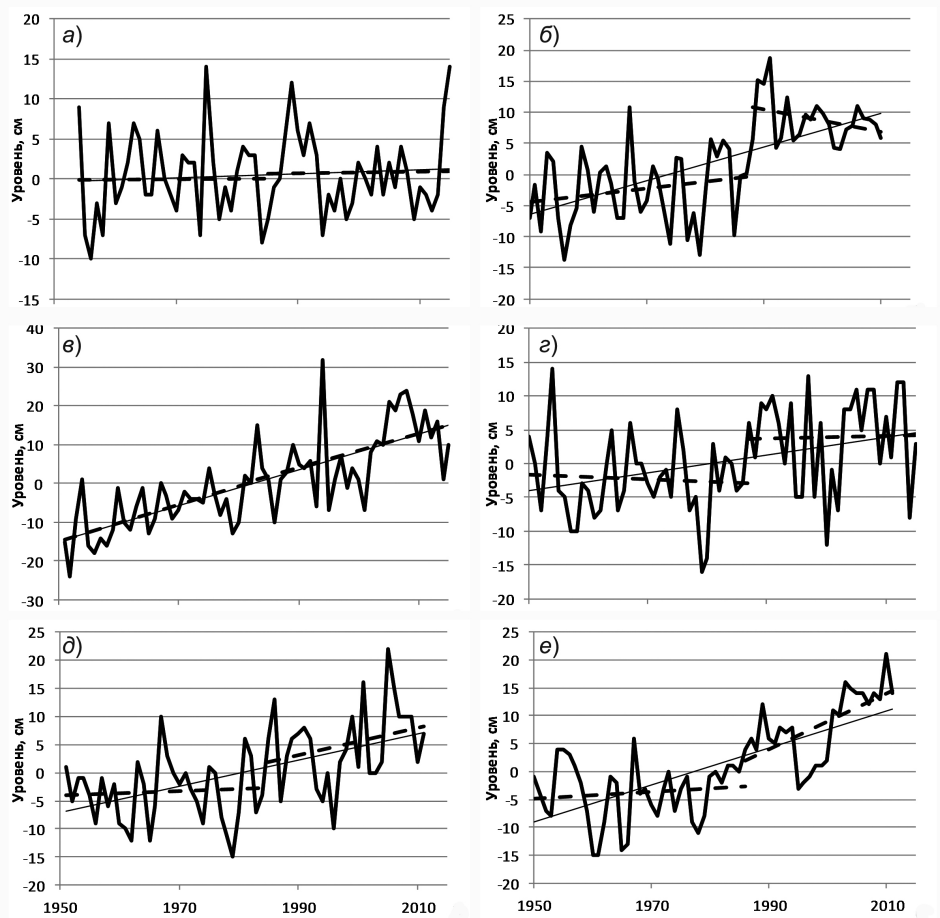


Рис. 3. Аномалии многолетнего хода уровня на станциях: а) — о-ва Известный ЦИК; б) — ГМО им. Е.К. Федорова (бывш. Мыс Челюскина); в) — о. Котельный; г) — пр. Санникова; д) — о-ва Дунай; е) — Певек. Прямыми линиями представлены линейные тренды для разных периодов.

равна $-0,34$ мм/год, во второй период она повысилась до $2,81$ мм/год. В эту группу входят станции Баренцева моря, станции юго-западной части Карского моря, а также о-ва Дунай, Тикси и Певек. На баренцевоморских станциях до 1980-х гг. наблюдались отрицательные тренды уровня, что, скорее всего, связано с геологическим фактором. Но после 1980-х гг. тенденция характеристики поменялась, и уровень практически постоянно повышался с интенсивностью $2,89$ мм/год. На юго-западе Карского моря, на станциях Амдерма и Усть-Кара, до переломного момента уровень менялся очень незначительно, но после величина тренда достигла в среднем $4,13$ мм/год. На станциях о-ва Дунай и Тикси величина трендов уровня в период после 1980-х гг. несколько ниже — $2,17$ мм/год, а в Певеке — $1,34$ мм/год. Стоит отметить, что на станциях этой группы наблюдается самая высокая разница между средними значениями уровня для двух периодов: в Баренцевом море в среднем — $9,47$ см, в Карском море — $12,73$ см, на станции о-ва Дунай — $9,14$ см, на станции Певек — $11,6$ см. И это вполне логично, ведь уровень здесь постоянно растет, повышая эту разницу год за годом.

IV группа

В этой группе находятся станции, на которых ряды изменчивости многолетнего уровня являются нестационарными, но, в отличие от станций III группы, на этих станциях после 1980-х гг. значительного роста уровня не наблюдается. Среднегого-летний уровень моря здесь повысился довольно резко в течение 1980-х гг., а затем он или же практически не изменялся, или же вовсе уменьшался. В эту группу входят все станции, расположенные на востоке Карского моря, а также станция пр. Санникова в море Лаптевых. Разница между средними значениями уровня для разных периодов здесь несколько ниже и составляет для Карского моря в среднем 8,74 см, для станции пр. Санникова — 6,39 см. Также важно отметить, что на станциях Мыс Стерлегова и Мыс Челюскина в период после 1980-х гг. наблюдаются довольно значимые отрицательные тренды.

Подытоживая все вышесказанное, можно с уверенностью сказать, что многолет-ний уровень в арктических морях за последние 60 лет изменялся различным образом. И как уже говорилось выше, сложно произвести какое-либо четкое пространственное районирование по тому или иному типу изменчивости уровня.

На станциях I и II группы долгопериодная изменчивость уровня частично или полностью зависит от геологических факторов. Все они находятся в районах, где в плейстоценский период находился ледниковый щит, который на современном этапе исчез (Монин, 1977). После таяния ледника земная кора медленно поднимается, изменяя уровень океана. Станции этих двух групп охватывают все скандинавское побережье Норвежского моря, северную часть Баренцева моря, включая сюда воды вокруг архипелагов Шпицберген и Земля Франца-Иосифа, далее идет северная часть Карского моря и моря Лаптевых. Станции III группы охватывают три района северного побережья России: юг Баренцева моря, юго-запад Карского моря, юг моря Лаптевых. Скорее всего, сюда можно включить и всю южную часть Восточно-Сибирского моря, но имеются данные только со станции Певек, и утверждать, что подобная из-менчивость уровня присутствует по всему побережью моря, было бы неправильно. Станции IV группы расположены на востоке Карского моря.

Таким образом, главной особенностью структуры тенденции межгодовых из-менений уровня арктических морей является присутствие или отсутствие излома локальных линейных трендов в период до 1980-х гг. и после.

ЧАСТОТНАЯ СТРУКТУРА КОЛЕБАНИЙ СРЕДНЕГОДОВЫХ ВЫСОТ УРОВНЯ В АРКТИЧЕСКИХ МОРЯХ ЗА ПОСЛЕДНИЕ 60 ЛЕТ

Известно, что приливообразующие силы Луны и Солнца, свободные и вынуж-денные колебания полюсов Земли, неравномерные изменения скорости вращения Земли и другие астрономические факторы вызывают циклические и гармонические колебания уровня моря. В Северном Ледовитом океане наиболее часто проявляются гармонические колебания ледовых и океанических характеристик с периодом 7 лет (так называемый «полюсный прилив» (О'Сонног, 1986)), 11-летняя цикличность, которую чаще всего связывают с циклом солнечной активности (Максимов, 1970), 19-летний деклинационный прилив (Royer, 1993) и 60-летняя цикличность, связанная с изменением орбитальных параметров Земли, ее положением в Солнечной системе (Максимов, 1970). Нами была выполнена проверка предположения о том, что комби-нация циклических колебаний может образовать квантованный переход локального линейного тренда от временной стадии 50–80-е гг. XX в. к стадии после 1980-х гг.

лет до начала текущего столетия. Для этой цели нами была исследована частотная структура колебаний среднегодовых высот уровня на каждой станции арктических морей за период 55–67 лет.

Спектральный анализ (Гордеева, 2010) временных серий среднегодового уровня на береговых станциях показал, что в колебаниях уровня моря преобладают 7, 11 и 19-летние вариации. В табл. 3 приведены результаты расчетов характеристик основных мод колебаний. Амплитуда 7-летней цикличности находится в пределах 1–3,5 см, 11-летней гармоникой колеблется от 1 до 4 см и 19-летней гармоникой — в пределах от 1 до 3 см. Вклад цикличностей в общую дисперсию ряда составляют: 7-летней цикличности — от 1 до 14 %; 11-летней гармоникой — от 1 до 12 % и 19-летней гармоникой — от 1 до 10 %.

Региональные особенности частотной структуры колебаний уровня проявились в следующем. В морях Северо-Европейского бассейна исследуемые гармоники проявляются довольно слабо, в отличие от морей сибирского шельфа. По некоторым исследованиям (Сарухян, 1967) известно, что в морях с более замкнутым внутренним бассейном амплитуды рассматриваемых гармоник несколько выше, чем в открытых морях. По этой причине, вследствие наибольшей «открытости» западных морей, на

Таблица 3

Основные характеристики гармоник колебаний среднегодового уровня на станциях морей Северного Ледовитого океана

Станции	7 лет		11 лет		19 лет	
	<i>A</i>	<i>V</i>	<i>A</i>	<i>V</i>	<i>A</i>	<i>V</i>
Рейкьявик	1,945672	5,859203	1,225492	2,324451	1,775537	4,879313
Баренцбург	1,404772	4,345426	2,024011	9,020827	1,940959	8,295705
Олесунн	1,199077	3,094379	1,445889	4,499345	1,520718	4,977108
Тромсё	1,885027	9,33538	1,779815	8,322362	1,03485	2,813533
Хаммерфест	1,418105	4,42156	0,647621	0,922148	1,648816	5,977276
Мурманск	1,469175	1,528683	2,655336	4,993546	2,958344	6,198226
Малые Кармакулы	1,766018	2,283796	3,118324	7,120486	1,489291	1,624151
Амдерма	1,557674	1,38725	2,711035	4,202151	1,244554	0,885583
Усть-Кара	1,136222	1,292188	2,36594	5,60282	1,459141	2,131049
Сопочная Карга	2,036138	3,652339	2,58433	5,88373	1,967934	3,411755
Диксон	3,031972	7,494211	2,925406	6,976664	2,294291	4,291138
Стерлегова	3,584345	8,838209	3,630486	9,067221	3,574301	8,788747
Известий ЦИК	1,906924	6,643244	2,644108	12,77238	1,227537	2,752851
Голомянный	1,949914	7,121547	2,695562	13,60949	2,16928	8,814029
Челюскин	2,601534	6,160103	3,18758	9,248068	0,675266	0,41503
Дунай	1,304242	1,468266	0,871862	0,656121	2,418759	5,049789
Тикси	2,324897	7,152976	2,010114	5,347128	1,483007	2,910486
Котельный	2,749028	2,876313	2,59868	2,570298	3,079611	3,609688
Санникова	3,455552	11,82087	1,995822	3,943284	2,939051	8,55123
Кигилях	2,894377	13,70647	2,66529	11,62263	2,337061	8,936252
Певек	2,721895	5,635393	2,420691	4,457181	1,606076	1,962067

Примечание: *A* — амплитуда гармоник; *V* — вклад гармоник в общую дисперсию рядов.

западных станциях наблюдаются довольно малые величины амплитуд гармоник. Здесь стоит отметить 11 и 19-летние волны в Баренцевом море, амплитуда которых равна 2,89 и 2,22 см соответственно. В среднем же для североευропейского бассейна амплитуда 7-летней волны равна 1,58 см, при вкладе в дисперсию — 4,41 %, 11-летней — 1,84 см, при вкладе в дисперсию — 5,31 %, 19-летней — 1,77 см, при вкладе в дисперсию — 4,63 %.

В разных частях Карского моря исследуемые гармоники проявляют себя различно. 7-летняя гармоника на севере и юго-западе выражается значительно слабее, нежели на востоке моря. Здесь ее амплитуда достигает значения 2,88 см, а вклад в дисперсию составляет 6,66 %. В целом же по Карскому морю амплитуда 7-летней волны составляет 2,17 см, при вкладе в дисперсию — 5,20 %. Довольно велика амплитуда 11-летней волны во всех частях Карского моря, но вновь мы наблюдаем наиболее высокие значения на востоке — 3,05 см. В целом же здесь наблюдается 11-летняя волна с амплитудой 2,79 см, и вкладом в дисперсию 8,30 %. 19-летняя волна также наиболее выражена на востоке Карского моря. Ее амплитуда — 2,61 см. А в целом по морю амплитуда данной волны достигает 1,99 см с вкладом в дисперсию 4,43 %.

В море Лаптевых 7 и 11-летние волны проявляются довольно ярко. 7-летняя волна в среднем достигает амплитуды, равной 2,55 см, при вкладе в дисперсию 7,19 %, а 11-летняя — 2,22 см, при вкладе в дисперсию — 5,56 %. Довольно низки значения амплитуды 19-летней волны в море Лаптевых, особенно в восточной части, где амплитуда не достигает даже 1 см.

В Восточно-Сибирском море, а точнее на станции Певек, наиболее ярко проявляются волны с наименьшим периодом, амплитуды которых достигают 2,72 см и 2,42 см. Амплитуда 19-летней волны равна 1,60 см.

Анализ характеристик гармоник для каждой станции показывает, что даже в случае резонанса трех цикличностей, что может реализоваться в исключительно редком случае, вклад основных гармоник в общую дисперсию ряда не будет превосходить 20–25 %.

ПРИЧИНЫ ИЗМЕНЧИВОСТИ ЛОКАЛЬНЫХ ЛИНЕЙНЫХ ТРЕНДОВ УРОВНЯ АРКТИЧЕСКИХ МОРЕЙ ОТ СТАДИИ 1950–1980 К СТАДИИ 1990–2012 гг.

Феномен излома локальных линейных трендов или отсутствие такового трудно объяснить влиянием космогеофизических сил, результат воздействия которых, как показано в предыдущем разделе, невелик. Учитывая циклический характер рассматриваемых колебаний, их совокупное действие вряд ли сформирует излом локальных линейных трендов. Роль геолого-геодинамических процессов на полувековом масштабе колебаний уровня моря также мала. Различие в характере колебаний уровня в периоды до 80-х гг. XX в. и после, по мнению авторов, следует связывать с влиянием гидрометеорологических факторов, воздействие которых на уровень океана могло существенно измениться в связи с изменением климата в Арктике от середины XX в. к концу XX — началу XXI в.

Для подтверждения этого тезиса было произведено сравнение состояния климатической системы арктической зоны в период 1950–1980 гг. с ее состоянием в 1990–2012 гг. Для характеристики климата Арктики нами были привлечены известные климатические индексы, информация о которых представлена для научной общественности на сайте (<http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/climateindices/list/>). Нами

использованы следующие метеорологические индексы, характеризующие особенности атмосферной циркуляции в области севернее широты 30°: Северо-Атлантическое колебание (North Atlantic oscillation, NAO), Арктическое колебание (Arctic Oscillation, AO), Тихоокеанский-Североамериканский индекс (Pacific North American index, PNA), Арктический диполь (Arctic Dipol, AD). Для характеристики теплового состояния использовалась средняя температура воздуха в области севернее широты 60° (Temperature of Atmosphere, Ta). Тепловое состояние Северной Атлантики, и тепловое состояние северной части Тихого океана также оказывают большое влияние на Северный Ледовитый океан (СЛО). Поэтому для характеристики состояния климатических стадий были использованы также океанические индексы: Атлантическое мультideкадное колебание (Atlantic Multidecadal Oscillation, AMO), Тихоокеанское декадное колебание (Pacific Decadel Oscillation, PDO).

Перечисленные индексы были осреднены за периоды 1950–1980 гг. и 1990–2012 гг. Затем аномалии этих индексов были отнесены к размаху изменения от стадии к стадии и получены доли развития каждого индекса отдельно в процентах, значения которых представлены в табл. 4. Индекс AMO был взят с запаздыванием на 3 года; это тот период, в течение которого тепловая аномалия Северной Атлантики достигает пролива Фрама и вторгается в Евразийский суббассейн Северного Ледовитого океана. Индекс PDO вошел в расчеты с запаздыванием на 1 год. Это составляет тот временной лаг, в течение которого аномалия PDO переносится к Берингову проливу и поступает в Чукотское море, а далее — в Амеразийский суббассейн Северного Ледовитого океана.

Таблица 4

**Относительная роль (%) климатического индекса (с учетом его знака)
в формировании климатического состояния северной полярной области
в периоды 1950–1980 и 1990–2012 гг.**

Индексы	1950–1980 гг.	1990–2012 гг.
NAO	19	–81
AO	–65	35
PNA	–44	56
AD	–35	65
Ta	–37	63
AMO (–3)	–25	75
PDO (–1)	–97	3

Сравнение относительной роли индексов в формировании климатического состояния исследуемых двух периодов позволяет сделать следующие выводы. В 1950–1980 гг. доминировал антициклонический характер атмосферной циркуляции в Арктике (положительные значения NAO и отрицательные значения AO), а в 1990–2012 гг. — доминировал так называемый циклонический режим. Существенно изменилась роль особенностей атмосферной циркуляции, моделируемая индексами PNA и AD. Значительно изменилось тепловое состояние приземной атмосферы (индекс Ta) в сторону потепления последней климатической стадии. Во втором периоде экстремально выросла роль положительных значений индекса AMO в изменении состояния СЛО, что выразилось в известном потеплении вод атлантического происхождения в Арктическом бассейне (Polyakov et al., 2012). От первого периода ко второму поменялась также роль теплового влияния северной части Тихого океана

(PDO) на климатическое состояние Северного Ледовитого океана. Приведенные данные свидетельствуют о значительном отличии климатического состояния Арктики в последнее десятилетие 1990–2012 гг. от такового в 1950–1980 гг. Несомненно, что уровень моря, как компонента Арктической климатической системы, также изменил режим долгопериодных колебаний, что нашло отражение в различии локальных линейных трендов для выделенных двух климатических периодов.

Но как менялись сами климатические индексы в течение анализируемого периода 1950–2012 гг. и не наблюдалась ли в их изменчивости структура, которая индуцировала резкие переходы колебаний уровня от одной тенденции к другой? В межгодовых изменениях индексов атмосферной циркуляции NAO и AO (рис. 4) можно выделить линейные тренды для периода с 1950 по 1985 г., когда тенденции NAO и AO были близки к нулю, и для периода после 1985 г. по настоящее время, характеризующегося тенденцией значительного уменьшения этих индексов, что можно трактовать как формирование преобладающего циклонического режима приземной атмосферной циркуляции.

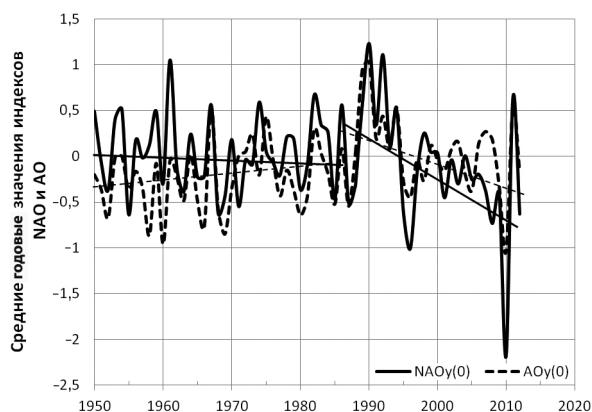


Рис. 4. Межгодовые изменения климатических индексов NAO и AO и их линейных трендов (тонкие линии: сплошная линия — NAO, пунктирная — AO) для периодов с 1950 по 1985 г. и с 1985 г. по настоящее время.

В изменениях климатических индексов PNA и AD отмечается слабый положительный линейный тренд без локальных линейных трендов (графики не приводятся). Температура воздуха в Арктике незначительно повышалась до 1980-х, а затем произошло значительное потепление, наблюдающееся и в настоящее время (Алексеев и др., 2015).

Структура межгодовых колебаний теплового состояния Северной Атлантики (индекс AMO) и северной части Тихого океана (индекс PDO) оказалась более сложной (рис. 5). В межгодовой изменчивости этих индексов можно формально выделить локальные линейные тренды. Для индекса PDO это период его увеличения с 1950-х до конца 1980-х, что сопрягается с генеральным уменьшением потока тихоокеанских вод через Берингов пролив в Арктический бассейн, и период уменьшения PDO с 1990-х по настоящее время, когда поток тихоокеанских вод стал увеличиваться, особенно в начале текущего столетия (Woodgate et al., 2012). Отметим, что аномалия тихоокеанских вод, пройдя Берингов пролив, достигает центральной части Канадской котловины через 2–3 года.

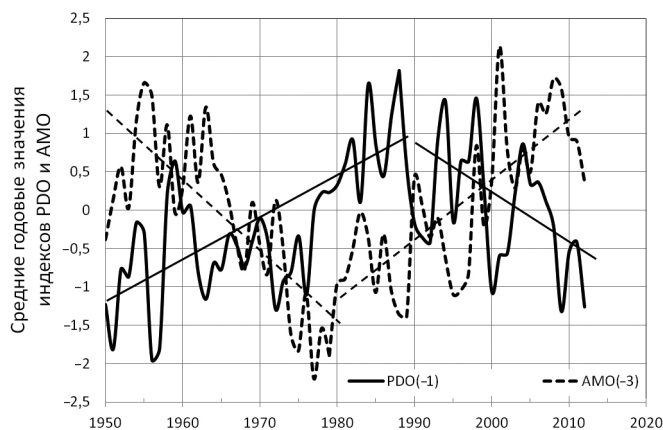


Рис. 5. Многолетние колебания среднегодовых индексов теплового состояния в северной части Тихого океана (индекс PDO со сдвигом в 1 год) и Северной Атлантики (индекс АМО со сдвигом в 3 года). Тонкими линиями отмечены линейные тренды (сплошная линия — PDO, пунктирная — АМО).

В изменениях климатического индекса АМО локальные линейные тренды противоположны таковым индекса PDO (рис. 5). В первом периоде до конца 1970-х наблюдалось уменьшение индекса, которое сопровождалось понижением температуры атлантических вод, поступающих в Северо-Европейский суббассейн через Фареро-Шетландский пролив и в Арктический бассейн через пролив Фрама и Баренцево море. Во втором периоде с 1980-х по настоящее время наблюдалось генеральное увеличение АМО, что сопровождалось увеличением потока теплых и соленых атлантических вод из Северной Атлантики в СЛО. Подчеркнем, что аномалия атлантических вод, входящая в Фареро-Шетландский пролив, через 1,5–2 года пересекает пролив Фрама и через 5–7 лет достигает района хребта Ломоносова, т.е. границы между Евразийским и Амеразийским суббассейнами СЛО. Указанные временные лаги распространения атлантических или тихоокеанских вод в СЛО, вероятно, также оказывают влияние на уровенный режим.

Таким образом, проведенное исследование подтверждает наш тезис, что изменения в тенденции колебаний уровня моря на прибрежных станциях являются следствием изменения климата в Арктике, проявившегося в значительных изменениях климатических характеристик.

Сравнительный анализ временных серий аномалии среднегодового уровня на станциях (рис. 2 и 3) и многолетних колебаний среднегодовых климатических индексов (рис. 4 и 5) указывает на их определенную сопряженность. Несомненно, что рельеф дна и конфигурация берега, специфика влияния каждого фактора в зависимости от географического положения пункта наблюдений за уровнем моря создают региональные особенности уровенного режима. Чтобы учесть интегральный эффект влияния всех климатических индексов на уровень моря, нами были получены уравнения множественной корреляции для среднегодового уровня на станциях Мурманск (H_Mur), Диксон (H_Dik), Тикси (H_Tik) и Певек (H_Pev), которые представляют различные регионы Арктики. При построении уравнений были использованы только те факторы, которые имели значимый коэффициент корреляции. В результате были получены следующие уравнения:

$$H_Mur = 2,6Ta(0) + 13,6AMO(-3) + 3,2AO(0) + 5,5AO(-1) + 6,0PNA(-1) + 40,2; \quad (1)$$

$$H_Dik = 15,5AO(0) - 6,1NAO(0) + 5,5AD(-1) + 19,3AMO(-6) + 9,1PNA(0) + 5,2PNA(-1) + 3,76; \quad (2)$$

$$H_Tik = 1,55Ta(0) + 8,4AO(0) - 3,38NAO(0) + 0,026RivEC(-3) + 17,41; \quad (3)$$

$$H_Pev = 2,31Ta(-1) + 15,9AO(0) - 7,36NAO(0) + 9,08PNA(0) + 11,0AMO(-6) - 5,19AD(0) + 37,15. \quad (4)$$

В правой части уравнений (1) – (4) среднегодовые значения индексов NAO, AO, PNA, AD вошли синхронно, показатель (0), или с опережением на 1 год, показатель (–1). Среднегодовой сток рек в моря Лаптевых и Восточно-Сибирское, RivEC, с опережением на 3 года вошел в уравнение (3). Среднегодовой индекс АМО вошел определяющей функцией с временным лагом (–3) для уровня на станции Мурманск (Баренцево море) и с лагом (–6) для уровня на станции Диксон (Карское море). Среднегодовая температура воздуха оказалась одним из определяющих факторов для трех станций. Общий коэффициент корреляции для каждого уравнения (1)–(4) равен соответственно 0,80; 0,76; 0,70 и 0,83. Столь высокая корреляция для многолетних изменений уровня моря свидетельствует о том, что вошедшие в уравнения (1)–(4) среднегодовые индексы описывают основную долю колебаний уровня моря.

Из структуры уравнений (1)–(4) видно, что индексы входят в уравнения в разном сочетании, но индекс АО входит в каждое, а NAO и Та входят в три уравнения. Принимая во внимание резкие изменения в тенденциях этих индексов (рис. 4), а также индекса АМО (рис. 5), заключаем, что локальные тренды среднегодовых уровней на береговых станциях являются проявлением климатических изменений, выражаемых изменениями прежде всего таких характеристик, как NAO, АО, PNA, AD, Та, АМО и пресноводный сток рек, в частности RivEC. Таким образом можно утверждать, что основной причиной текущих изменений положения уровенной поверхности в СЛО являются макроциркуляционные процессы в атмосфере и океане. Несомненно, что географическое положение береговой станции, рельеф прибрежной зоны и конфигурация береговой линии также вносят свои особенности в уровенный режим, но механизм и оценки этого влияния должны составить отдельное исследование.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ расширенной базы данных уровенных наблюдений на береговых станциях арктического побережья позволил получить представления о многолетней тенденции изменения уровня моря. Новые оценки линейных трендов указывают на повышение уровня моря на всех станциях, для которых выполнялся анализ, за исключением станции Баренцбург, где наблюдается отрицательный линейный тренд уровня моря.

Установлены стадии многолетних колебаний уровня, проявившиеся в резких изменениях локальных линейных трендов. Таким образом, выяснено, что в различных частях Арктического бассейна эти изменения проявляются различным образом, но при этом стоит отметить две особенности: практически на всех станциях произошел резкий подъем уровенной поверхности, что подтверждается довольно большой разницей среднемноголетних значений уровня для двух периодов; этот подъем начался в 80–90-е гг. XX столетия.

Выполнен анализ частотной структуры колебаний среднегодовых высот уровня в арктических морях за последние 60 лет, результаты которого показывают, что

космофизические факторы имеют совсем небольшое влияние на многолетнюю изменчивость уровня моря.

Отсюда можно утверждать, что именно гидрометеорологические факторы явились главными причинами в резких изменениях локальных линейных трендов уровня арктических морей.

Проанализированы причины изменчивости локальных линейных трендов уровня арктических морей от стадии 1950–1980 гг. к стадии 1990–2012 гг. Локальные тренды среднегодовых уровней на береговых станциях являются следствием изменения прежде всего таких характеристик состояния климата, как индексы NAO, AO, PNA, AD, Ta, АМО и пресноводный сток рек, в частности RivEC.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Александров Е.И. Мониторинг климата приземной атмосферы Северной полярной области // Обзор гидрометеорологических процессов в Северной полярной области. 2017. СПб.: ААНИИ, 2017. С. 26–27.

Алексеев Г.В., Радионов В.Ф., Александров Е.И., Иванов Н.Е., Харланенкова Н.Е. Изменения климата Арктики при глобальном потеплении // Проблемы Арктики и Антарктики. 2015. № 1 (103). С. 32–41.

Ашик И.М. Колебания уровня арктических морей в период МПГ // Океанография и морской лед. М.; СПб.: ООО «Паулсен», 2011. С. 269–270.

Ашик И.М., Павлов В.К. Сезонные и многолетние колебания уровня в морях северо-европейского бассейна Северного Ледовитого океана // Проблемы Арктики и Антарктики. 2008. № 3 (80). С. 98–114.

Гордеева С.М. Практикум по дисциплине статистические методы обработки и анализа гидрометеорологической информации. СПб.: РГГМУ, 2010. 74 с.

Ежегодные данные о режиме и качестве вод морей и морских устьев рек. Якутск: Якутское УГМС, 2016. 96 с.

Максимов И.В. Геофизические силы и воды океана. Л.: Гидрометиздат, 1970. 445 с.

Монин А.С. История Земли. Л.: Наука, 1977. 228 с.

Сарухнян Э.И. «Полусный прилив» в Мировом океане: Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Л.: ААНИИ, 1967. 13 с.

Фролов И.Е. и др. Научные исследования в Арктике. Т. 2: Климатические изменения ледяного покрова морей Евразийского шельфа. СПб.: Наука, 2007. С. 12–21.

O'Connor W. The 14 month wind stressed residual circulation (Pole tide) in the north sea // NASA Technical Memorandum 87800. Maryland, 1986. P. 23.

Pavlov V.K. Seasonal and long-term sea level variability in the marginal seas of the Arctic Ocean // Polar Research. Tromso, 2001. Vol. 20 (2). P. 153–160.

Polyakov I.V., Pnyushkov A.V., Timokhov L.A. Warming of the Intermediate Atlantic Water of the Arctic Ocean in the 2000s // J. of Climate. 2012. Vol. 25. P. 8362–8370. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00266.1>

Royer T. High-Latitude oceanic variability associated with the 18.6-year nodal tide // J. of Geophys. Research. 1993. Vol. 98. № C3. P. 4639–4644.

Woodgate R.A., Weingartner T.J., Lindsay R. Observed increases in Bering Strait oceanic fluxes from the Pacific to the Arctic from 2001 to 2011 and their impacts on the Arctic Ocean water column // Geophys. Res. Lett. 2012. Vol. 39. L24603, doi:10.1029/2012GL054092.

**TENDENCIES OF MULTI-YEAR VARIABILITY OF THE SEA LEVEL
AT THE COASTAL STATIONS OF THE ARCTIC OCEAN**

New estimates of linear trends in the position of the level surface were obtained as a result of analysis of the data of long-term observations of sea level fluctuations at the stations of the seas of the Arctic Ocean. A rise in sea level is observed at almost all stations. In multi-year fluctuations of the level, periods characterized by different values of linear trends are identified. The reasons for the variability of local linear trends in the level of the Arctic seas from the 1950-1980 stage to the 1990-2015 period are analyzed. It is shown that the presence of local trends during the annual average levels at coast stations is a consequence of changes in climatic conditions reflected in changes in atmospheric and hydrosphere climatic indices, as well as in freshwater river runoff.

Keywords: Arctic ocean, sea level, coast stations, linear trends of sea level, stages of multi-year level fluctuations.