

Оценочный прогноз изменений отдельных компонентов природной среды на основе регрессионной модели

Валерий Михайлович Фёдоров^[0000-0003-2305-7408]1,2,

Екатерина Валерьевна Фёдорова^[0000-0001-8054-2763]1,2,

Алим Михайлович Залиханов^[0000-0002-2540-6045]1,3

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

²E-mail: fedorov.msu@mail.ru, ³E-mail: bulungu@yandex.ru

Аннотация. Представлены результаты оценочного прогноза изменения отдельных компонентов природной среды в XXI в. Прогноз выполнен с использованием регрессионной модели и инсоляционной контрастности в качестве предиктора. Определено, что уровень Мирового океана к концу текущего столетия достигнет значения 476 мм (относительно начала XXI в.). По сравнению с 2020 г. повышение составит 168 мм. Среднегодовая площадь морских льдов в Северном полушарии с 2020 по 2100 гг. сократится на 3,39 млн. км² или на 29,4%, минимальная – на 5,65 млн. км² или на 77,1%. В 2050 г. уменьшение площади морских льдов в Северном Ледовитом океане относительно 2018 г. составит для среднегодовой площади 18,3%, для максимальной – 10,1%, для минимальной – 60,3%. В среднем по девяти ледниковым районам Северного полушария сокращение баланса массы льда с 1900 по 2050 гг. оценивается в 42,9 м водного эквивалента (в.э.). С 2020 по 2050 гг. в среднем, по ледникам, охваченным балансовыми наблюдениями в Северном полушарии сокращение массы льда ожидается равным 8,8 м в.э.

Ключевые слова: оценочный прогноз; регрессионная модель; инсоляционная контрастность, уровень мирового океана; площадь морских льдов; баланс массы ледников

1 Введение

Проблема изменений современного глобального климата и, связанных с ним изменений окружающей природной среды и отдельных ее компонентов представляется актуальной, как для науки, так и для практической деятельности [4, 12]. Основным источником энергии природной системы Земли и фактором изменения состояния природной среды в пространстве и во времени является солнечная радиация. Изменение температурного режима Земли в основном определяется усилением меридионального переноса тепла из экваториальной области в полярные районы. Усиление меридионального переноса тепла регулируется меридиональным градиентом инсоляции, который связан с изменением наклона оси вращения Земли [19].

Целью представленной работы является составление оценочных прогнозов отдельных компонентов окружающей природной среды на основе регрессионной модели. В качестве регрессора используется годовая и летняя инсоляционная контрастность – ИК (рис. 1), которая обобщенно, по областям источника и стока тепла, отражает многолетние изменения меридионального градиента инсоляции, регулирующего перенос энергии в системе «океан – атмосфера» [19]. ИК линейно связана с изменением угла наклона оси вращения Земли.

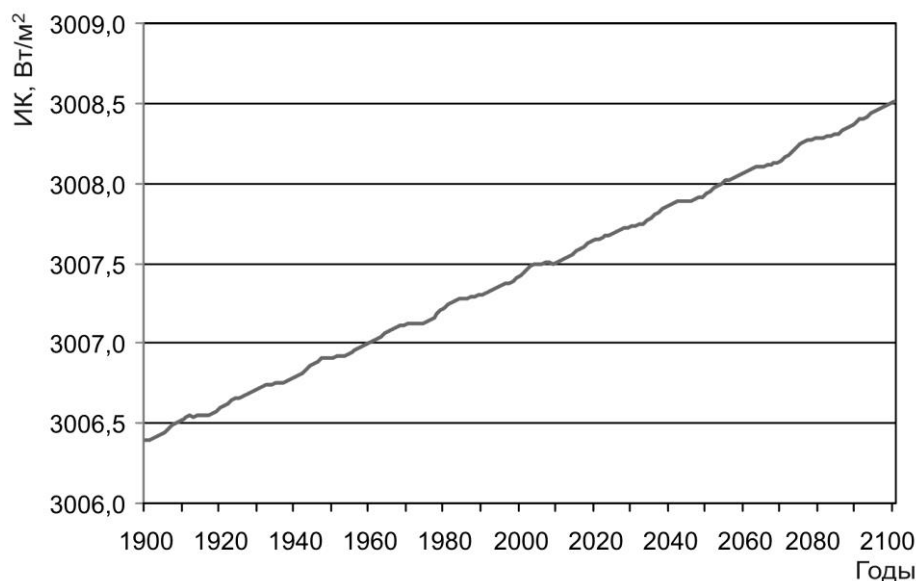


Рис. 1. Многолетние изменения летней инсоляционной контрастности в Северном полушарии (сглаженной по 30 годам методом скользящего среднего)

2 Прогноз изменения уровня Мирового океана

С отмечаемыми тенденциями повышения приповерхностной температуры воздуха (ПТВ) и температуры поверхности океана (ТПО), определяемыми усилением меридионального переноса тепла из-за уменьшения наклона оси вращения Земли и увеличения меридионального градиента инсоляции на верхней границе атмосферы (ВГА), связан тренд повышения уровня Мирового океана (УМО).

Изменение УМО определяется эвстатическими и изостатическими причинами. Первые связаны с таянием ледников [14-16, 23] и многолетних морских льдов [17, 21, 22], которое определяется вариациями температурных характеристик приземной атмосферы и поверхностного слоя океана (аномалии ПТВ и ТПО). От изменения температуры зависят процессы испарения и выпадения атмосферных осадков [2, 3], а также плотностная (стерическая) составляющая изменения УМО, связанная с расширением удельного объема воды в поверхностном слое океана.

В общей климатологии УМО рассматривается как интегральный индикатор глобального водообмена, перераспределяющего воды гидросферы между отдельными оболочками Земли, прежде всего между ледниковыми покровами и водами суши. Одновременно с этим УМО испытывает стерические колебания, возникающие под действием главным образом температуры верхнего слоя океана, а также частично от поступления пресных вод с ледников и речных водосборов [2, 3, 9]. Объемные изменения УМО в основном представляют собой сумму эвстатических факторов и стерической компоненты. Предполагается, что в современных климатических условиях при глобальном осреднении колебания УМО за счет современных вертикальных движений земной коры, имеющих разный знак в различных регионах Земли, изменения эвстатической компоненты нивелируются [2]. Таким образом, изостатические деформации УМО предполагаются несущественными на рассматриваемом временном интервале.

Исходными данными по изменению УМО были три ряда годовых значений, охватывающих период с 1842 и с 1860 г. по 2008 г. Ряд 1 – результат реконструкции (с 1842 по 2008 гг.) уровня океана и данных инструментальных наблюдений, которые были получены в Российском государственном гидрометеорологическом университете (РГГМУ) [8, 9]. Ряд 2 охватывал период с 1860 по 2008 гг. [29], ряд 3 – с 1842 по 2008 гг. [31]. Для сравнения указанных рядов УМО они были совмещены на отметке 100 мм для 1901 г. [8]. Эти ряды, предоставленные авторам В.Н. Малининым (РГГМУ), анализировались в связи с изменением значений годовой ИК.

Многолетняя изменчивость УМО более чем на 95% выражается трендами. Исходные ряды обладают значительным сходством (коэффициент парной корреляции между ними превышает 0,985). Их корреляционный анализ с годовой ИК (не сглаженной) показывает высокую связь между изменением УМО и меридионального распределения инсоляции. Значение коэффициента корреляции (R) для ряда 1 составляет 0,908, для ряда 2 – 0,910, для ряда 3 – 0,929. С учетом высоких значений R авторами публикации были рассчитаны линейные и полиномиальные (полином второй степени) уравнения регрессии годовой ИК и значений УМО для всех трех рядов.

Прогноз выполнялся на основе регрессионной модели с годовой ИК (сглаженной по 30-летним скользящим средним). Прогностические значения рассчитывались по ансамблю линейных и полиномиальных решений. Сглаживание проводилось для исключения полученных расхождений в фактических и рассчитанных значениях УМО, связанных с нутационным циклом [19]. Колебания, обусловленные этим циклом (с периодом около 19 лет), проявляются в изменении ИК, но не выражены в многолетних вариациях УМО. Оценочный прогноз изменения УМО выполнялся на текущее столетие с 2009 г. в связи с тем, что исходными данными охватывается период до 2008 г. (включительно) (рис. 2).

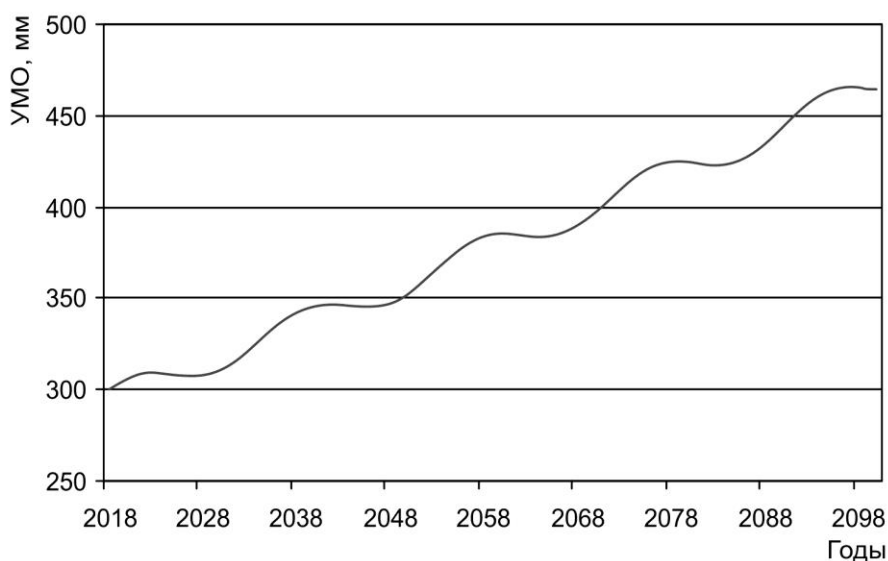


Рис. 2. Оценочный прогноз изменения УМО (среднее по рядам 1, 2 и 3)

По рассчитанным данным (осредненным по трем прогностическим рядам), к концу текущего столетия УМО достигнет значения 476 мм. Относительно 2020 г. (308 мм) это повышение УМО составит 168 мм или 54,6%. Последствиями отмечаемого в связи с потеплением климата повышения УМО могут стать подтопления (особенно в результате ветровых нагонов) территорий, расположенных вблизи отмечаемых высотных уровней, абразионный и термоабразионный размыв берегов и отступление береговой линии. Однако масштабы этих процессов будут в основном уступать величинам, прогнозируемым на основе численного моделирования. При различных заданных сценариях [10] роста концентрации парниковых газов в период 1990–2100 гг. физико-математическим моделированием прогнозируется подъем УМО в пределах 140–800 мм [5]. По авторским статистическим расчетам в период с 2020 по 2100 гг. повышение УМО составит 168 мм.

3 Прогноз изменения площади морских льдов в Северном полушарии и Северном Ледовитом океане

Изменения в криосфере Земли связаны, прежде всего, с вариациями глобальной температуры, которая представляет собой один из основных показателей изменяющегося климата. Следствием тенденции увеличения ПТВ и ТПО являются современные тенденции криосферных процессов – сокращение площади морских льдов, деградация горного и материкового (Антарктида, Гренландия) оледенения и мерзлоты, а также многие экологические проблемы в Арктике, связанные с активизацией процессов термоабразии и термоденудации берегов арктических морей, термоэрозии, термокарста и др.

Льды занимают около 6% поверхности Земли или, приблизительно, 30 млн. км². Основная их масса сосредоточена в Арктике и Антарктике. В Северном материковом полушарии на льды суши приходится всего 20% общей площади оледенения Арктики, остальные 80% – на морские льды [7]. Сезонные изменения оледенения суши и моря в Арктике в настоящее время происходят на площади приблизительно от 7 до 15 млн. км². Летом площадь морских льдов сокращается примерно вдвое. Интересно, что также вдвое сокращается поступление солнечной радиации в зимнее полугодие по сравнению с летним в полушарии [19].

Ледяной покров – это результат взаимодействия океана и атмосферы в определенных температурных условиях [1, 17, 25]. Его важнейшим параметром является площадь. С течением времени она испытывает изменения, наиболее масштабные из которых сезонные, межгодовые и многолетние. Изучение самих вариаций и причин, их вызывающих, составляет одну из наиболее актуальных задач криолитологии и морского ледоведения [1, 25]. Изменения площади морских льдов происходят в основном в летнее полугодие. Авторами публикации определена тесная корреляционная связь многолетних изменений площади морских льдов в Северном полушарии с многолетними изменениями годовой и летней ИК, отражающей интенсивность меридионального переноса радиационного тепла (табл. 1). Исходными данными по площади морских льдов были значения реконструкции с 1870 по 2006 гг. [28, 33, 35].

Таблица 1. Значения коэффициента корреляции (статистически значимы с вероятностью 0,99) площади морских льдов в Северном полушарии с годовой и сезонной ИК (1870–2006 гг.)

Площадь льдов / ИК	Годовая	Летняя	Зимняя
Среднегодовая	-0,771	-0,772	-0,053
Минимальная	-0,812	-0,811	0,080
Сезонная амплитуда	0,821	0,821	-0,079

На основе найденных уравнений регрессии (линейное и полиномиальное уравнения) рассчитывались значения показателей площади морских льдов на период с 2017 по 2100 гг. (рис. 3). В качестве предиктора в этом случае использовалась летняя ИК в Северном полушарии.

Анализ полученных результатов (по ансамблю линейных и полиномиальных – полином второй степени – решений) показывает, что среднегодовая площадь морских льдов в Северном полушарии с 2020 по 2100 гг. уменьшится (с 11,55 до 8,16 млн. км²) на 3,39 млн. км² или на 29,4%. Минимальная площадь сократится (с 7,33 до 1,68 млн. км²) на 5,65 млн. км² или на 77,1%. Сезонная амплитуда площади морских льдов за это время увеличится (с 7,42 до 11,90 млн. км²) на 4,29 млн. км² или на 56,3%.

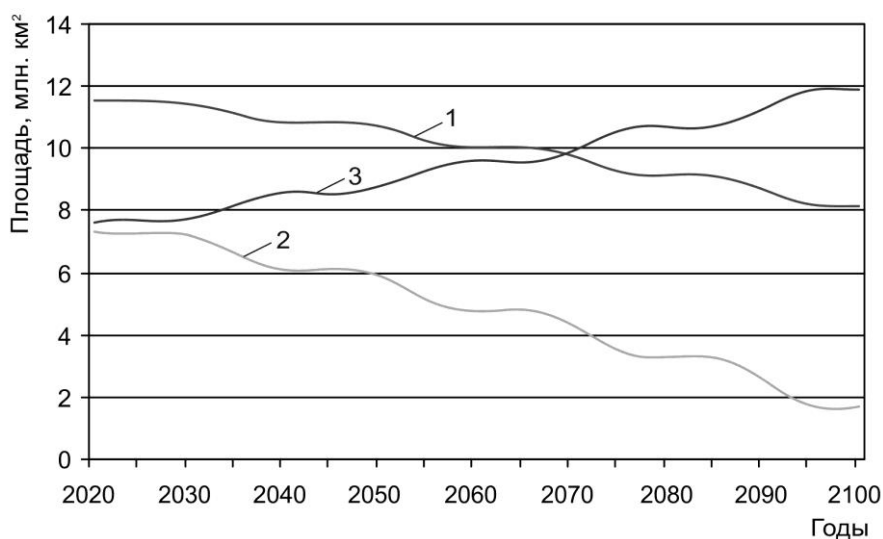


Рис. 3. Оценочный прогноз изменения среднегодовой (1), минимальной (2) и сезонной амплитуды (3) площади морских льдов в Северном полушарии

Рассчитанные значения показателей площади морских льдов характеризуются высокими значениями коэффициента корреляции с вычисленными ранее по регрессионной модели значениями аномалии ТПО и ПТВ (без учета КМО) [19]. За период с 1850 по 2050 гг. R для рассчитанной среднегодовой, минимальной и сезонной амплитуды площади морских льдов и полученных значений аномалии ТПО и ПТВ составляет $-0,935$, $-0,957$ и $0,963$ соответственно. Такие большие величины R определяются природой исходных показателей площади морских льдов, представляющих собой реконструированные на основе температурных данных значения [34, 35].

С 1979 г. ведутся спутниковые наблюдения за изменением площади морского льда в Северном Ледовитом океане (рис. 4). Спутниковые данные [13] характеризуются высокими значениями R , как с соответствующими рядами реконструкции [28], так и с летней ИК. Например, для интервала с 1979 по 2006 гг. коэффициент корреляции между показателями максимальной площади по реконструкции [35] и спутниковым данным составляет $0,911$, между данными по минимальной площади – $0,938$. Значения R среднегодовой, максимальной и минимальной площади морских льдов с летней ИК соответственно равны $-0,920$, $-0,876$ и $-0,836$.

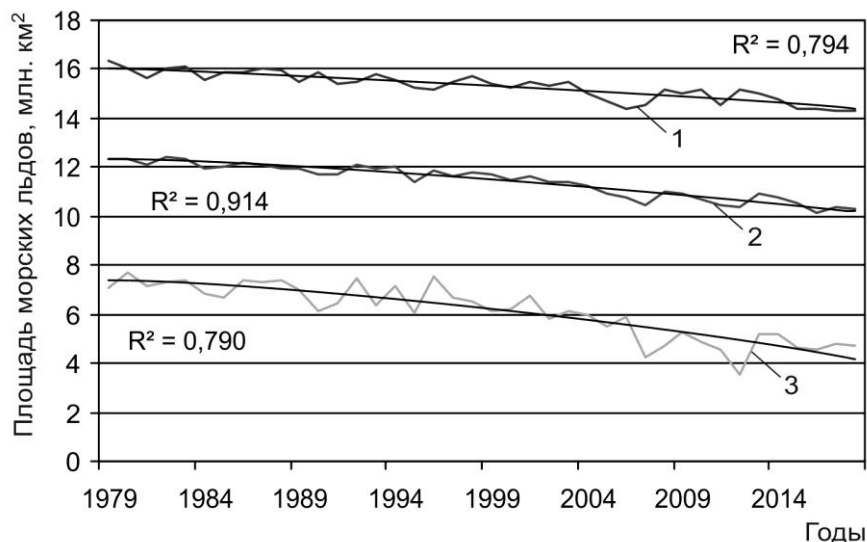


Рис. 4. Данные спутниковых наблюдений за площадью морских льдов в Северном Ледовитом океане и их тренды (полиномы второй степени): 1 – максимальной, 2 – среднегодовой, 3 – минимальной

По уравнениям регрессии (с летней ИК Северного полушария) были выполнены расчеты площади морских льдов в Северном Ледовитом океане. По ансамблю линейных и полиномиальных решений вычислялись средние значения площади морских льдов. Расчет дисперсии (по фактическим значениям площади морских льдов и разности соответствующих фактических и рассчитанных значений) показывает, что многолетними изменениями летней ИК определяется 95,1% многолетней изменчивости среднегодовой площади морских льдов в Северном Ледовитом океане, 93,5% максимальной и 89,2% минимальной соответственно.

По ансамблю линейных и полиномиальных решений выполнен оценочный прогноз изменения площади морских льдов в Северном Ледовитом океане на период до 2050 г. (что определяется относительно малой продолжительностью исходных данных спутниковых измерений) (рис. 5).

В 2050 г. среднегодовая площадь морских льдов в Северном Ледовитом океане составит 8,43 млн. км², максимальная – 12,86 млн. км², минимальная – 1,87 млн. км². Относительно 2018 г. среднегодовая площадь в 2050 г. уменьшится на 1,89 млн. км², максимальная – на 1,44 млн. км², минимальная – на 2,84 млн. км². Таким образом, в сравнении с 2018 г. сокращение среднегодовой площади морских льдов в Северном Ледовитом океане составит 18,3%, максимальной – 10,1%, минимальной – 60,3%.

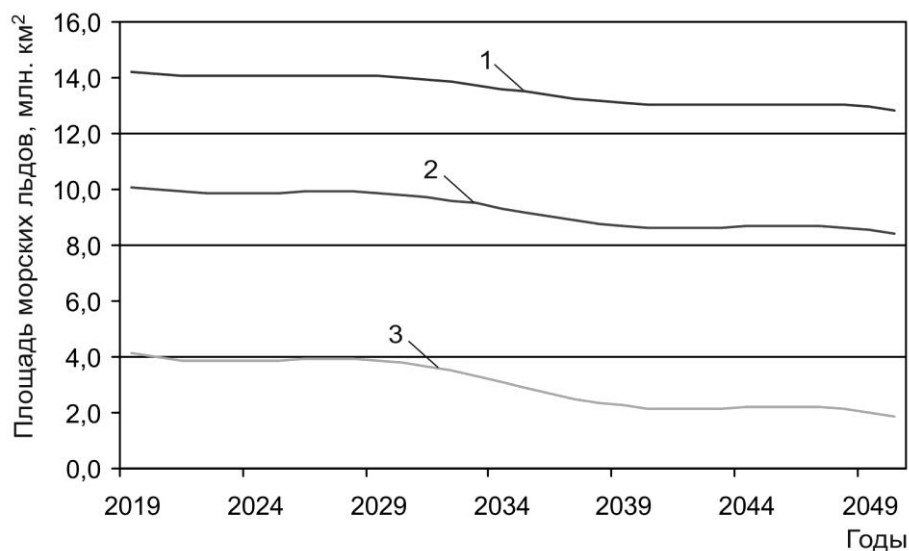


Рис. 5. Оценочный прогноз площади морских льдов в Северном Ледовитом океане по данным спутниковых наблюдений: 1 – максимальной, 2 – среднегодовой, 3 – минимальной

Известны физико-математические (динамико-термодинамические и физико-статистические) модели, на основе которых рассчитывается площадь морских льдов в Северном полушарии до 2090 г. [30, 33]. В табл. 2 приведены среднегодовые значения рассчитанной за период 2011–2030 гг. максимальной и минимальной площади морских льдов по различным физико-математическим моделям.

Таблица 2. Рассчитанная площадь морского льда в Северном полушарии

Модель	Максимальная площадь (март), млн км ²	Минимальная площадь (сентябрь), млн км ²
CGCM2	15,14	3,33
CSM_1.4	15,00	7,00
ESMAM4/OPYC3	15,62	6,03
GFDL-R30_c	15,60	5,91
HadCM3	15,33	6,22

Примечание: CGCM2 – модель Канадского центра моделирования и анализа климата, CSM_1.4 – модель Национального центра атмосферных исследований (США), ESMAM4/OPYC3 – модель Института метеорологии Макса Планка (Германия), GFDL-R30_c – модель Лаборатории геофизической гидродинамики

Национального управления океанических и атмосферных исследований (США), HadCM3 – модель Центра Хэдли Метеорологического бюро (Великобритания).

Полученное авторами публикации на основе реконструкции [35] по ансамблю линейных и полиномиальных статистических решений среднее значение минимальной площади морских льдов в Северном полушарии для периода с 2011 по 2030 гг. составляет 7,53 млн. км², т.е. является более консервативным, чем представленные в табл. 2 результаты модельных расчетов. Максимальная площадь на этом интервале в среднем составляет 14,98 млн. км² (очень близкое совпадение с результатом модели CSM_1.4. Минимальная площадь также ближе всего к результатам этой модели.

Отмечается, что полученные в результате расчета по перечисленным моделям значения площади морских льдов заметно различаются как между собой, так и при сравнении с наблюдающимися фактическими данными [25]. Наиболее существенная разница характерна для вычислений минимальной площади морских льдов. В среднем (см. табл. 2) расхождение между результатами расчетов этого параметра по различным моделям для периода 2011–2030 гг. составляет 0,95 млн. км² или 16,6% от среднего по всем моделям значения площади морских льдов (5,70 млн. км²). Отличия между рассчитанными по отдельным моделям результатами определяются разницей в алгоритмах расчета и используемых исходных данных. При этом различия между фактическими и рассчитанными значениями отражают уровень адекватности физико-математической модели [5, 20, 27].

Сводный анализ по шести моделям IPCC показывает, что минимальная (сентябрь) площадь морского льда около 1,00 млн. км² (то есть, «свободная ото льда Арктика») будет достигнута приблизительно к 2037 г. (в интервале от 2026 по 2046 гг.) [28, 32]. По полученным авторами публикации данным на основе регрессионной модели с использованием реконструкции [35] минимальная площадь морских льдов в Северном полушарии в 2050 г. будет составлять около 5,88 млн. км². По оценочному прогнозу с использованием спутниковой информации минимальная площадь морских льдов в Северном Ледовитом океане в 2050 г. сократится до 1,87 млн. км².

Опыт прогнозных статистических оценок изменения площади морских льдов на основе данных инсоляции может иметь теоретическое значение при разработке стратегических планов нового этапа освоения российской Арктики с учетом оценки состояния арктической природной среды в будущем. Также полученные результаты могут оказаться полезными в практике нефте- и газодобычи на арктическом шельфе, в развитии рыболовства, судоходства, при строительстве гидротехнических и иных сооружений в прибрежных районах и на островах данного региона.

4 Прогноз изменения суммарного баланса массы ледников в ледниковых районах Северного полушария

Прогноз изменения баланса массы льда в ледниковых районах представляется актуальным, во-первых, в связи с тем, что ледники являются индикаторами региональных климатических изменений. Во-вторых, горные ледники – одна из составляющих водных ресурсов, учет которых важен для определения стратегии социально-экономического развития регионов.

Многолетние изменения массы льда в ледниковых районах Земли связаны, прежде всего, с изменением глобальной температуры. Перенос тепла в планетарной системе связан с циркуляционными процессами в атмосфере и океане. Они в свою очередь вносят существенные изменения в годовой, сезонный и суточный ход изменения температуры воздуха, который определяется поступающей от Солнца энергией. Кроме того, циркуляционные процессы в атмосфере существенно деформируют связанную с приходящей солнечной радиацией суточную, сезонную и годовую периодичность в изменении температурного режима (в синоптическом масштабе времени). С циркуляционными процессами в атмосфере связано образование и распространение атмосферных осадков. Они влияют и на ход основных климатических показателей, определяющих условия развития ледников, и в связи с этим представляются (наряду с приходящей от Солнца радиацией) важнейшим фактором как распространения ледников в пространстве, так и их развития во времени. При этом общий ход циркуляционных процессов тесно связан с инсоляцией [24].

Динамика ледников во многом определяется температурным режимом, тесно связанным с ИК [18, 23], в связи с этим для анализа и прогноза многолетних изменений суммарного баланса массы льда в ледниковых районах Северного полушария использовались рассчитанные и сглаженные (по 30-летним скользящим средним) значения летней ИК в Северном полушарии. Анализ проводился по временным рядам, включающим инструментальные измерения суммарного баланса массы и данные реконструкции [14]. Для всех девяти анализируемых ледниковых районов Северного полушария обнаружена тесная связь изменений суммарного баланса массы льда с летней ИК (табл. 3). Среднее значение суммарного баланса массы для ледникового района определялось осреднением данных, полученных в результате инструментальных наблюдений и реконструированных, по суммарному балансу массы ледников, охваченных инструментальными наблюдениями [14–16, 18]. В качестве исходных для реконструкции и прогноза использовались результаты инструментальных наблюдений баланса массы льда для отдельных ледников, представленные в сборниках *Fluctuations of glaciers* [11].

В исходных рядах регионально осредненного суммарного баланса массы многолетние изменения в основном учитываются линейным и полиномиальным трендами (см. табл. 3). В связи с этим корреляционное сопоставление этих трендов с трендами угла наклона оси и летней ИК (83–85% дисперсии в этих рядах

также учитывается трендами) представляется оправданным для объяснения причин более чем 90% изменений регионально осредненного суммарного баланса массы льда.

Таблица 3. Значения коэффициента корреляции (R) суммарного баланса массы льда в ледниковых районах с летней ИК и коэффициента детерминации (R^2) тех же исходных рядов

№ п/п	Ледниковый район	R	R^2	
			Тренд	
			линейный	полиномиальный
1	Скандинавия	-0,787	0,840	0,964
2	Шпицберген	-0,885	0,997	0,997
3	Канадский Арктический архипелаг	-0,688	0,577	0,940
4	Аляска	-0,874	0,947	0,975
5	Кордильеры	-0,883	0,975	0,987
6	Альпы	-0,841	0,890	0,946
7	Кавказ	-0,845	0,940	0,992
8	Тянь-Шань	-0,887	0,985	0,987
9	Памиро-Алай	-0,875	0,960	0,962
Среднее		-0,841	0,901	0,972

На основе найденной корреляционной связи с летней ИК были построены уравнения регрессии (линейные и полиномиальные – полином второй степени) суммарного баланса массы и ИК. Коэффициент детерминации (R^2) рассматривают, как правило, в качестве основного показателя, отражающего меру качества регрессионной модели, описывающей связь между зависимой и независимыми переменными (табл. 4). Этот коэффициент показывает, какая доля вариации, объясняемой переменной, учитывается в модели и определяется влиянием на нее факторов, включенных в модель (чем ближе R^2 к 1, тем выше качество модели).

Прогноз выполнялся по ансамблю линейных и полиномиальных решений последовательным алгебраическим сложением рассчитанных годовых значений баланса массы льда с суммарным, полученным по исходным рядам (рис. 6). Годовые величины вычислялись по определенным на основе регрессионной модели значениям регионально осредненного суммарного баланса массы льда в м водного эквивалента (в.э.) [14]. В результате получен характер изменения регионально осредненного суммарного баланса массы льда для девяти ледниковых районов Северного полушария с 1900 по 2050 гг. (см. рис. 6).

Таким образом, для среднего (из охваченных балансовыми наблюдениями) по району леднику максимальная потеря льда с 1900 по 2050 гг. отмечается для Шпицбергена – 67,9 м в.э. Для регионально осредненного суммарного баланса массы льда на Шпицбергене получена линейная зависимость от летней ИК. Значительные потери льда отмечаются на Аляске – 53,6 м в.э., в Кордильерах – 54,2 м в.э. и на Тянь-Шане – 52,4 м в.э. Несколько меньшие за 150 лет потери массы льда получены для Альп – 46,3 м в.э. и Памиро-Алая – 44,5 м в.э. На Кавказе этот показатель за указанный период составляет около 30,0 м в.э.

Таблица 4. Значения коэффициента детерминации (R^2) в уравнениях регрессии и дисперсии для ансамблевых статистических решений по уравнениям регрессии

№ п/п	Ледниковые районы	R^2		Дисперсия D , %
		Регрессия		
		линейная	полиномиальная	
1	Скандинавия	0,827	0,963	0,929
2	Шпицберген	0,992	0,992	0,992
3	Канадский Арктический архипелаг	0,580	0,942	0,942
4	Аляска	0,946	0,976	0,946
5	Кордильеры	0,973	0,983	0,980
6	Альпы	0,887	0,941	0,928
7	Кавказ	0,932	0,986	0,973
8	Тянь-Шань	0,983	0,984	0,984
9	Памиро-Алай	0,960	0,902	0,942
Среднее		0,898	0,963	0,959

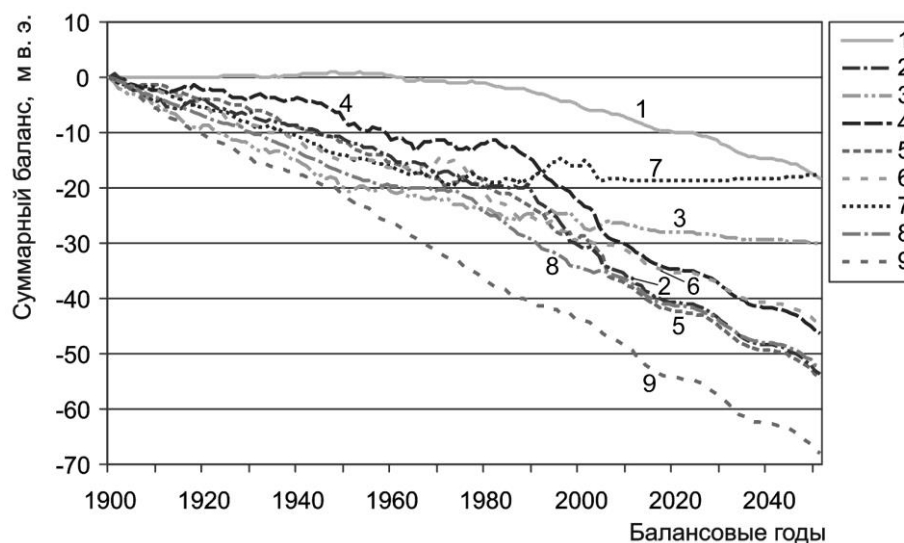


Рис. 6. Динамика регионально осредненного суммарного баланса массы льда в ледниковых районах Северного полушария в XX в. и в первой половине XXI в. 1 – Скандинавия, 2 – Шпицберген, 3 – Канадский Арктический архипелаг, 4 – Аляска, 5 – Кордильеры, 6 – Альпы, 7 – Кавказ, 8 – Тянь-Шань, 9 – Памиро-Алай

Минимальные потери льда с начала прошлого столетия до настоящего времени отмечаются в Скандинавии и на Канадском Арктическом архипелаге – 17,4 и 18,3 м в.э. соответственно. Скандинавские ледники испытывают сильное влияние Атлантики (Исландского минимума атмосферного давления), проявляющееся в циклоническом переносе с запада и юго-запада морских воздушных масс по Исландско-Карской ложбине [7, 26]. Поэтому здесь потери льда в результате увеличения глобальной ПТВ (абляции) в значительной мере компенсируются увеличением атмосферных осадков (аккумуляцией). Небольшое сокращение массы льда на Канадском Арктическом архипелаге объясняется малыми абсолютными значениями балансовых показателей.

В период с 2017 по 2050 гг. для Скандинавии и Кавказа ожидается стационарное (или близкое к нему) состояние регионально осредненного суммарного баланса массы льда. В Скандинавии потери за этот период составят 1,3 м в.э., на Кавказе – около 2,0 м в.э. [23]. Минимальное сокращение массы льда в этих районах может определяться усилением циклонической деятельности и переноса морских воздушных масс в районе Скандинавии с Атлантики, на Кавказе – со Средиземного моря. Таким образом, связанное с усилением меридионального теплообмена воздействие роста ПТВ на ледники (абляции) в этих районах полностью или частично компенсируется увеличением атмосферных осадков (аккумуляцией), которое в свою очередь также определяется усилением меридионального переноса тепла, что подтверждается увеличением продолжительности действия меридиональной южной группы циркуляции [6].

В других ледниковых районах Северного полушария потери льда за этот период в среднем будут находиться в пределах от 9,0–10,0 м в.э. (Канадский Арктический архипелаг, Памиро-Алай) до 12,0–14,0 м в.э. (Альпы, Аляска, Кордильеры, Шпицберген). Таким образом, в генетическом плане развитие Скандинавских и Кавказских ледников в условиях усиления меридионального переноса тепла и влаги в большей степени обусловлено атмосферными осадками (аккумуляцией) и в меньшей степени – адвекцией тепла (абляцией). В остальных районах тенденции изменения суммарного баланса массы в основном определяются переносом радиационного тепла (абляцией), связанным с усилением МГИ из-за уменьшения наклона оси вращения Земли [18, 19]. Таким образом, деградация горных ледников объясняется усилением меридионального переноса тепла. В Скандинавии и на Кавказе тенденция сокращения замедляется циркуляционными процессами (увеличение атмосферных осадков), в остальных районах ускоряется ими [14 – 16, 18].

В среднем по всем ледниковым районам Северного полушария уменьшение суммарного баланса массы с 1900 по 2050 гг. составит 42,9 м в.э., а с 2020 по 2050 гг. – 8,8 м в.э.

5 Заключение

Применение простых регрессионных моделей для оценки изменения отдельных компонентов окружающей природной среды представляется оправданными и актуальным. Это определяется, как необходимостью таких оперативных оценок, так и существующими проблемами физико-математического моделирования и неопределенностью сценарной концепции прогнозов, предлагаемой IPCC.

По рассчитанным данным, к концу текущего столетия УМО достигнет значения 476 мм. Относительно 2020 г. (308 мм) это повышение составит 168 мм или 54,6%.

Ожидается, что среднегодовая площадь морских льдов в Северном полушарии с 2020 по 2100 гг. сократится на 3,39 млн. км² (с 11,55 до 8,16 млн. км²) или на 29,4%, минимальная площадь – на 5,65 млн. км² (с 7,33 до 1,68 млн. км²) или на 77,1%. Сезонная амплитуда площади морских льдов за это время увеличится на 4,29 млн. км² (с 7,42 до 11,90 млн. км²) или на 56,3%.

По результатам статистического прогнозирования в 2050 г. среднегодовая площадь морских льдов в Северном Ледовитом океане составит 8,43 млн. км², максимальная – 12,86 млн. км², минимальная – 1,87 млн. км². Относительно 2018 г. среднегодовая площадь в 2050 г. сократится на 1,89 млн. км², максимальная – на 1,44 млн. км², минимальная – на 2,84 млн. км². Относительно 2018 г. сокращение среднегодовой площади морских льдов в Северном Ледовитом океане составит 18,3%, максимальной – 10,1%, минимальной – 60,3%.

В среднем по всем ледниковым районам сокращение суммарного баланса массы с 1900 по 2050 гг. достигнет 42,9 м в.э. С 2020 по 2050 гг. среднее для ледника, охваченного балансовыми наблюдениями в ледниковом районе, сокращение ожидается равным 8,8 м в.э.

Благодарность

Работа выполнена в соответствии с госбюджетными темами «Эволюция, современное состояние и прогноз развития береговой зоны Российской Арктики» (121051100167-1) и «Географические основы устойчивого развития энергетических систем с использованием возобновляемых источников энергии» (121051400082-4).

Литература

1. Захаров В.Ф., Малинин В.Н. Морские льды и климат. Спб.: Гидрометеиздат, 2000. 92 с.
2. Клиге Р.К. Изменение глобального водообмена, отв. ред. М.И. Львович, И.Д. Цигельная. М.: Наука, 1985. 247 с.
3. Клиге Р.К., Малинин В.Н., Шевчук О.И., 2009. Колебания уровня Мирового океана в XX столетии. Вестник Московского университета. Серия 5. География, № 1, 2009. С. 7–13.

4. Кондратьев К.Я. Глобальный климат. Спб.: Наука, 1992. 359 с.
5. Кондратьев К.Я. Демирчян К.С., 2001. Климат земли и «Протокол Киото». Вестник Российской Академии наук, 2001. Том 71. № 11. С. 1002–1009.
6. Кононова Н.К. Исследования многолетних колебаний циркуляции атмосферы Северного полушария и их применение в гляциологии. Материалы гляциологических исследований, 2003. Вып. 95. С. 45–65.
7. Корякин В.С. Ледники Арктики. М.: Наука, 1988. 160 с.
8. Малинин В.Н. Уровень океана: настоящее и будущее. Спб.: Изд-во Российского государственного гидрометеорологического университета, 2012. 260 с.
9. Малинин В.Н., Гордеева С.М., Шевчук О.И. Изменчивость уровня Мирового океана за последние 140 лет. Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета, 2007. № 4. С. 125–131.
10. О новых сценариях анализа выбросов, изменения климата, воздействий и стратегий реагирования. Техническое резюме, 2008. Изд-во Межправительственной группы экспертов по изменению климата, Женева, Швейцария. URL: <https://archive.ipcc.ch/pdf/supporting-material/expert-meeting-ts-scenarios-ru.pdf> (дата обращения: 29.01.2022).
11. Официальный сайт Всемирной службы мониторинга ледников (WGMS), 2022. Сборники Fluctuations of glaciers. URL: http://wgms.ch/products_fog/ (дата обращения: 29.01.2022).
12. Официальный сайт Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК), 2022. URL: <http://www.ipcc.ch/> (дата обращения: 29.01.2022).
13. Официальный сайт Национального центра данных по снегу и льду (NSIDC), 2022. URL: <https://nsidc.org/> (дата обращения: 29.01.2022).
14. Федоров В.М. Динамика баланса массы ледников в связи с макроциркуляционными процессами в атмосфере. М.: Физматлит, 2011. 376 с.
15. Федоров В.М. Причины метахронности в динамике баланса массы льда в ледниковых районах Северного полушария. Криосфера Земли, 2011. Том XV. № 2. С. 70–80.
16. Федоров В.М. Изменения ледовых ресурсов отдельных ледниковых районов Северного полушария в XX в. Водные ресурсы, 2015. Том 42. № 1. С. 3–12, <https://doi.org/10.7868/S0321059424060066>.
17. Федоров В.М. Тенденции изменения площади морских льдов в Северном полушарии и их причины. Криосфера Земли, 2015. Том XIX. № 3. С. 52–64.
18. Федоров В.М. Прогноз изменения баланса массы льда в ледниковых районах Северного полушария. Криосфера Земли, 2018. Том XXII. № 4. С. 55–64, [https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2018-4\(55-64\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2018-4(55-64)).
19. Федоров В.М. Солнечная радиация и климат Земли. М.: Физматлит, 2018. 232 с.
20. Федоров В.М. Вариации инсоляции Земли и особенности их учета в физико-математических моделях климата. Успехи физических наук, 2019. Том 189. № 1. С. 33–46, <https://doi.org/10.3367/UFNr.2017.12.038267>.
21. Федоров В.М., Гребенников П.Б. Многолетняя динамика площади морских льдов в Северном полушарии в связи с изменением характеристик инсоляции. Криосфера Земли, 2021. Том XXV. № 2. С. 38–47, <https://doi.org/10.15372/KZ20210204>.
22. Федоров В.М., Гребенников П.Б., Фролов Д.М. Оценка роли инсоляционного фактора в изменениях площади морских льдов в Российской Арктике. Криосфера Земли, 2020. Том XXIV. № 3. С. 38–50, [https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2020-3\(38-50\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2020-3(38-50)).
23. Федоров В.М., Залиханов А.М. Анализ изменения ледовых ресурсов Центрального Кавказа. Труды Карадагской научной станции им. Т.И. Вяземского – Природного заповедника РАН, 2018. Вып. 3(7). С. 68–84.

24. Федоров В.М., Кононова Н.К. Солнечная радиация, приходящая на верхнюю границу атмосферы, и изменчивость циркуляционных процессов в Северном полушарии. Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова, 2015. № 576. С. 183–200.
25. Фролов И.Е., Гаврило В.П. (ред.). Морской лед. Спб.: Гидрометеиздат, 1997. 402 с.
26. Чижов О.П. Оледенение Северной полярной области. М.: Наука, 1976. 240 с.
27. Шерстюков Б.Г. Изменения, изменчивость и колебания климата. Обнинск. Изд-во Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации - Мирового центра данных, 2011. 293 с.
28. Chapman W.L., 2013. University of Illinois Sea Ice Dataset, Northern Hemisphere: 1870–2008. Publishing house of the University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, IL, USA.
29. Church J.A., White N.J., 2006. A 20th century acceleration in global sea-level rise. *Geophysical Research Letters*, Vol. 33, No. 1, L01602, <https://doi.org/10.1029/2005GL024826>.
30. IPCC, 2013. Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, in T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P.M. Midgley (eds). Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. URL: <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/> (дата обращения: 29.04.2021).
31. Jevrejeva S., Grinsted A., Moore J.C., Holgate S., 2006. Nonlinear trends and multiyear cycles in sea level records. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, Vol. 111, No. C9, C09012, <https://doi.org/10.1029/2005JC003229>.
32. Liu J., Song M., Horton R.M., Hu Y., 2013. Reducing spread in climate model projections of a September ice-free Arctic. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, Vol. 110, No. 31, pp. 12571–12576, <https://doi.org/10.1073/pnas.1219714210>.
33. Loeng H., Brander K., Carmack E., Denisenko S., Drinkwater K., Hansen B., Kovacs K., Livingston P., McLaughlin F., Sakshaug E., 2005. Chapter 8. Marine systems. In *Arctic Climate Impact Assessment*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp. 453–538.
34. Rayner N.A., Parker D.E., Horton E.B., Folland C.K., Alexander L.V., Rowell D.P., Kent E.C., Kaplan A., 2003. Global analyses of surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, Vol. 108, No. D14, 4407, <https://doi.org/10.1029/2002JD002670>.
35. Walsh J.E., Chapman W.L., 2001. 20th-century sea-ice variations from observational data. *Annals of Glaciology*, Vol. 33, pp. 444–448, <https://doi.org/10.3189/172756401781818671>.

References

1. Zaharov V.F., Malinin V.N. *Morskije l'dy i klimat*. Спб.: Гидрометеиздат, 2000. 92 с.
2. Klige R.K. *Izmenenie global'nogo vodoobmena, otv. red. M.I. L'vovich, I.D. Cigel'naya*. М.: Наука, 1985. 247 с.
3. Klige R.K., Malinin V.N., Shevchuk O.I., 2009. Kolebaniya urovnya Mirovogo okeana v XX stoletii. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5. Geografiya*, № 1, 2009. S. 7–13.
4. Kondrat'ev K.YA. *Global'nyj klimat*. Спб.: Наука, 1992. 359 с.
5. Kondrat'ev K.YA., Demirchyan K.S., 2001. Klimat zemli i «Protokol Kioto». *Vestnik Rossijskoj Akademii nauk*, 2001. Tom 71. № 11. S. 1002–1009.

6. Kononova N.K. Issledovaniya mnogoletnih kolebanij cirkulyacii atmosfery Sever-nogo polushariya i ih primenenie v glyaciologii. Materialy glyaciologicheskikh issle-dovaniy, 2003. Vyp. 95. S. 45–65.
7. Koryakin V.S. Ledniki Arktiki. M.: Nauka, 1988. 160 s.
8. Malinin V.N. Uroven' okeana: nastoyashchee i budushchee. Spb.: Izd-vo Rossijskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta, 2012. 260 s.
9. Malinin V.N., Gordeeva S.M., Shevchuk O.I. Izmenchivost' urovnya Mirovogo okeana za poslednie 140 let. Uchenye zapiski Rossijskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta, 2007. № 4. S. 125–131.
10. O novyh scenariyah analiza vybrosov, izmeneniya klimata, vozdeystvij i strategij reagirovaniya. Tekhnicheskoe rezyume, 2008. Izd-vo Mezhpripravitel'stvennoj gruppy eks-pertov po izmeneniyu klimata, ZHeneva, SHvejcariya. URL: <https://archive.ipcc.ch/pdf/supporting-material/expert-meeting-ts-scenarios-ru.pdf> (data ob-rashcheniya: 29.01.2022).
11. Oficial'nyj sayt Vsemirnoj sluzhby monitoringa lednikov (WGMS), 2022. Sbor-niki Fluctuations of glaciers. URL: http://wgms.ch/products_fog/ (data obrashcheniya: 29.01.2022).
12. Oficial'nyj sayt Mezhpripravitel'stvennoj gruppy ekspertov po izmeneniyu klimata (MGEIK), 2022. URL: <http://www.ipcc.ch/> (data obrashcheniya: 29.01.2022).
13. Oficial'nyj sayt Nacional'nogo centra dannyh po snegu i l'du (NSIDC), 2022. URL: <https://nsidc.org/> (data obrashcheniya: 29.01.2022).
14. Fedorov V.M. Dinamika balansa massy lednikov v svyazi s makrocirkulyacionnymi proces-sami v atmosfere. M.: Fizmatlit, 2011. 376 s.
15. Fedorov V.M. Prichiny metahronnosti v dinamike balansa massy l'da v lednikovyh rajonah Severnogo polushariya. Kriosfera Zemli, 2011. Tom XV. № 2. S. 70–80.
16. Fedorov V.M. Izmeneniya ledovyh resursov otdel'nyh lednikovyh rajonov Cever-nogo polushariya v XX v. Vodnye resursy, 2015. Tom 42. № 1. S. 3–12, <https://doi.org/10.7868/S0321059424060066>.
17. Fedorov V.M. Tendencii izmeneniya ploshchadi morskikh l'dov v Severnom polusharii i ih prichiny. Kriosfera Zemli, 2015. Tom XIX. № 3. S. 52–64.
18. Fedorov V.M. Prognoz izmeneniya balansa massy l'da v lednikovyh rajonah Sever-nogo polushariya. Kriosfera Zemli, 2018. Tom XXII. № 4. S. 55–64, [https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2018-4\(55-64\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2018-4(55-64)).
19. Fedorov V.M. Solnechnaya radiaciya i klimat Zemli. M.: Fizmatlit, 2018. 232 s.
20. Fedorov V.M. Variacii insolyacii Zemli i osobennosti ih ucheta v fiziko-matematicheskikh modelyah klimata. Uspekhi fizicheskikh nauk, 2019. Tom 189. № 1. S. 33–46, <https://doi.org/10.3367/UFNr.2017.12.038267>.
21. Fedorov V.M., Grebennikov P.B. Mnogoletnyaya dinamika ploshchadi morskikh l'dov v Cevernom polusharii v svyazi s izmeneniem harakteristik insolyacii. Kriosfera Zemli, 2021. Tom XXV. № 2. S. 38–47, <https://doi.org/10.15372/KZ20210204>.
22. Fedorov V.M., Grebennikov P.B., Frolov D.M. Ocenka roli insolyacionnogo fakto-ra v izmeneniyah ploshchadi morskikh l'dov v Rossijskoj Arktike. Kriosfera Zemli, 2020. Tom XXIV. № 3. S. 38–50, [https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2020-3\(38-50\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2020-3(38-50)).
23. Fedorov V.M., Zalianov A.M. Analiz izmeneniya ledovyh resursov Central'nogo Kavkaza. Trudy Karadagskoj nauchnoj stancii im. T.I. Vyazemskogo – Prirodnogo za-povednika RAN, 2018. Vyp. 3(7). S. 68–84.
24. Fedorov V.M., Kononova N.K. Solnechnaya radiaciya, prihodyashchaya na verhnyuyu granicu atmosfery, i izmenchivost' cirkulyacionnyh processov v Severnom polusharii. Tru-dy Glavnoj geofizicheskoy observatorii im. A.I. Voejkova, 2015. № 576. S. 183–200.
25. Frolov I.E., Gavrilov V.P. (red.). Morskoy led. Spb.: Gidrometeoizdat, 1997. 402 s.
26. Chizhov O.P. Oledenenie Severnoj polyarnoj oblasti. M.: Nauka, 1976. 240 s.

27. Sherstyukov B.G. *Izmeneniya, izmenchivost' i kolebaniya klimata*. Obninsk. Izd-vo Vse-rossijskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta gidrometeorologicheskoy in-formacii - Mirovogo centra dannyh, 2011. 293 s.
28. Chapman W.L., 2013. *University of Illinois Sea Ice Dataset, Northern Hemisphere: 1870–2008*. Publishing house of the University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, IL, USA.
29. Church J.A., White N.J., 2006. A 20th century acceleration in global sea-level rise. *Geophysical Research Letters*, Vol. 33, No. 1, L01602, <https://doi.org/10.1029/2005GL024826>.
30. IPCC, 2013. *Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, in T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P.M. Midgley (eds). Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. URL: <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/> (data obrashcheniya: 29.04.2021).
31. Jevrejeva S., Grinsted A., Moore J.C., Holgate S., 2006. Nonlinear trends and multiyear cycles in sea level records. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, Vol. 111, No. C9, C09012, <https://doi.org/10.1029/2005JC003229>.
32. Liu J., Songb M., Horton R.M., Hu Y., 2013. Reducing spread in climate model projections of a September ice-free Arctic. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, Vol. 110, No. 31, pp. 12571–12576, <https://doi.org/10.1073/pnas.1219714210>.
33. Loeng H., Brander K., Carmack E., Denisenko S., Drinkwater K., Hansen B., Kovacs K., Livingston P., McLaughlin F., Sakshaug E., 2005. Chapter 8. Marine systems. In *Arctic Climate Impact Assessment*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp. 453–538.
34. Rayner N.A., Parker D.E., Horton E.B., Folland C.K., Alexander L.V., Rowell D.P., Kent E.C., Kaplan A., 2003. Global analyses of surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, Vol. 108, No. D14, 4407, <https://doi.org/10.1029/2002JD002670>.
35. Walsh J.E., Chapman W.L., 2001. 20th-century sea-ice variations from observational data. *Annals of Glaciology*, Vol. 33, pp. 444–448, <https://doi.org/10.3189/172756401781818671>.

Estimative Forecast of Changes in the Individual Components of Environment based on a regression modelValery Fedorov^{1,2},Ekaterina Fedorova^{1,2},Alim Zalihanov^{1,3}¹Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia²E-mail: fedorov.msu@mail.ru, ³E-mail: bulungu@yandex.ru

Abstract. The study presents the results of an estimative forecast for the individual components of environment in XXI century. The forecast is based on a regression model and insolation contrast range as a predictor. It was determined that the level of the World Ocean by the end of the current century will reach the value of 476 mm (relative to the beginning of the XXI century). The raise comparatively to 2020 will be 168 mm. Average annual area of the sea ice in the Northern Hemisphere since 2020 to 2100 will decrease by 3.39 million km² or by 29.4%, the minimal one – by 5.65 million km² or 77.1%. By 2050 comparatively to 2018 decrease of the sea ice area in Arctic Ocean will be 18.3% for the average annual area, 10.1% - for the maximal, and 60.3% - for the minimal area. On average, for the nine glacial regions of the Northern Hemisphere, the reduction in the ice mass balance from 1900 to 2050 is estimated at 42.9 m of water equivalent (w.e.). From 2020 to 2050 on average, for the glaciers covered by balance observations in the Northern Hemisphere, the reduction in ice mass is expected to be 8.8 m w.e.

Key words: estimative forecast; regression model; insolation contrast range, World Ocean level; area of the sea ice; glacier mass balance

Acknowledgment

The work was carried out in accordance with the state budget themes "Evolution, current state and forecast of development of the coastal zone of the Russian Arctic" (121051100167-1) and "Geographical foundations of sustainable development of energy systems using renewable energy sources" (121051400082-4).