

ГЛОБАЛЬНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА И МИРОВОЙ ОКЕАН^{1,2}

ГУЛЕВ Сергей Константинович, д.ф.-м.н., член-корреспондент РАН, gul@sail.msk.ru, Институт океанологии им. П.П. Ширшова, Российская академия наук, Москва, Россия
Scopus Author ID: 7004415966

В статье анализируется роль океана в изменениях климата. Обсуждаются эффекты, связанные с аккумуляцией антропогенного тепла океаном, а также механизмы формирования собственных изменений в океане в масштабах десятилетий. Рассматриваются потоки климатически активных газов между океаном и атмосферой. Показано, что, будучи наиболее консервативным компонентом климатической системы, Мировой океан поглощает ~92% избыточного тепла, поступающего в систему в результате антропогенной деятельности. Это определяет примерно 50-60% вклад в рост уровня Мирового океана за счет стерического фактора. Также обосновывается, что океан – единственный компонент климатической системы, обладающий внутренними (собственными) модами изменчивости с длительными (от десятилетия до нескольких десятилетий) временными масштабами. Эти моды изменчивости (например, Атлантическая мультideкадная осцилляция) формируют отклики в атмосфере (в ходе процессов взаимодействия на границе океан-атмосфера), суперпозиция которых с глобальными трендами существенно снижает точность климатических прогнозов. Наконец, показано, что океаны и моря – мощнейшие нетто-поглотители климатически активных газов, в первую очередь, CO₂. С потеплением климата (и одновременным потеплением океана и морей) происходит медленное ослабление роли океана как поглотителя CO₂. Более того, с усилением штормовой активности в океанах и морях происходит также ослабление этой роли, так как штормовая активность приводит к увеличению эмиссии. Таким образом, глобальные и региональные балансы парниковых газов не могут быть достоверно оценены без учета роли океана.

Ключевые слова: Мировой океан, изменения климата, тепловой баланс, повышение уровня, потоки парниковых газов, система мониторинга.

DOI: 10.47711/0868-6351-201-25-36

Наблюдаемые изменения климата. Наблюдаемые сегодня климатические перемены на Земле являются беспрецедентными по интенсивности и скорости изменений ключевых климатических параметров, в первую очередь, приземной температуры. Этот вывод основан на заключениях всех оценочных докладов Межправительственной Группы Экспертов по Изменениям Климата (МГЭИК), включая последний, шестой, оценочный доклад, выпущенный в 2021 г. Десятилетие 2011-2020 гг. стало самым теплым за всю историю инструментальных наблюдений. Более того, начиная с 1980-х годов каждое последующее десятилетие было теплее, чем любое предыдущее после 1850 г. Глобальная приземная температура в 2011-2020 гг. была на 1,1°C выше, чем в 1850-1900 гг., при этом потепление над сушей (1,59°C) было существенно более сильным, чем над океанами (0,88°C). Средние темпы глобального потепления в течение 1976-2020 гг. составили 0,18°C/10 лет в глобальном масштабе, и только за этот период глобальная температура выросла на 0,8°C. Важно, что особенно быстро температура повышалась в Северной полярной области, где, согласно оценкам Росгидромета, линейный рост среднегодовой температуры за 30 лет (1991-2020 гг.) составил около 2,64°C при трендах, достигающих более 0,7°C в десятилетие [1].

¹ Данная работа выполнена в рамках Федеральной научно-технической программы в области экологического развития Российской Федерации и климатических изменений на 2021-2030 годы (FMWE-2023-0002). Анализ глобальных потоков энергии в системе океан-атмосфера выполнен за счет средств гранта Российского научного фонда № 23-47-00030.

² Основные данные, полученные автором и его коллегами в рамках реализации ВИПГЗ и в сжатом виде изложенные в данной статье, используются специалистами ИНИП РАН и их коллегами по консорциуму «Экономика климата» (см. статьи М.Г. Реиетникова и А.А. Широва в этом же номере журнала) в модельных расчетах при построении сценариев социально-экономического развития для выбора его наиболее устойчивой траектории на долгосрочную перспективу.

Эта неоднородность глобального потепления имеет критически важные последствия для территории России, где рост приземной температуры существенно превышает глобальный тренд. Согласно третьему Оценочному Докладу об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации, выпущенному Росгидрометом в 2022 г., территория России теплеет еще почти вдвое быстрее, чем суша в целом: $0,51^{\circ}\text{C}$ за десятилетие, причем каждое десятилетие с 1981-1990 гг. теплее предыдущего, а из десяти самых теплых лет девять наблюдались в XXI веке.

Наблюдаемые глобальные климатические изменения характеризуются также повышением влагосодержания атмосферы, поверхностной температуры океана и его теплосодержания, глобального уровня океана (более 3 мм в год за последние 30 лет), а также таянием ледников и уменьшением площади морских льдов (примерно на 40% в Арктике за последние 40 лет). Эти изменения климата рассматриваются сообществом климатологов, как беспрецедентные, поскольку никогда такие изменения не происходили столь быстро [1]. В течение геологической истории Земли были периоды, когда температура была, например, на 14°C выше современной (например, экстремум раннего эоцена примерно 60 миллионов лет назад), однако происходившие изменения занимали по времени десятки и сотни тысяч лет.

Наблюдаемые изменения неоднородно происходят на поверхности Земли. Тренды увеличения температуры воздуха более сильны в субполярных и полярных широтах по сравнению с тропиками (примерно в два-четыре раза). Наиболее сильное увеличение температуры океана происходит в западной области тропического Тихого океана и восточной области тропического Индийского океана. Неравномерно поднимается и уровень моря с максимальными трендами в тропиках и в полярных широтах и меньшими величинами в центральной Атлантике. В этом смысле климатические изменения на территории России характеризуются средним трендом температуры – $1,3^{\circ}\text{C}$ за последнее столетие, причем максимальные изменения отмечаются в северных приарктических регионах и на Европейской части РФ, и могут превышать 2°C за столетие. Важно отметить, что в последние несколько десятилетий тенденции изменений климата значительно усилились – это касается и глобальных, и региональных изменений. Так, рост температуры на территории России за последние четыре десятилетия в отдельных приарктических областях составляет до $3,5^{\circ}\text{C}$ в зимний сезон. В целом усиление (или ускорение, amplification) изменений климата наиболее сильно выражено в Арктической области. Кроме того, долгопериодные изменения происходят на фоне достаточно сильной межгодовой изменчивости, которая по магнитуде может быть сопоставима с долгопериодными трендами в этом же временном масштабе. Так, межгодовые изменения глобальной средней температуры могут составлять несколько десятых градуса, а межгодовые вариации площади льдов в Арктике могут составлять до 10% при многолетнем тренде в 30%.

Поэтому нельзя судить об изменениях климата на основе короткопериодных изменений, как положительных, так и отрицательных. Равно, нельзя судить (или ставить под сомнение) изменения климата на основе рассмотрения изменений в отдельных регионах, т. к. региональные изменения связаны с глобальными. При этом региональные изменения подвергаются наиболее тщательному анализу, поскольку именно они влияют на инфраструктуру, производственную деятельность, здоровье и условия жизни населения.

Роль океана в глобальных долгопериодных климатических изменениях. Рассматривая роль океана в глобальном изменении состояния климатической системы, необходимо отметить, что ключевым фактором является гораздо большая консервативность океана по отношению к атмосфере. Плотность морской воды несколько выше плотности пресной воды и в среднем равна 1026 кг/куб. м . Плотность воздуха

у поверхности Земли может меняться от 1,1 до 1,4 кг/куб. м, составляя в среднем 1,2 кг/куб. м. На высотах плотность воздуха значительно меньше, чем у земли, например, на высоте в десять километров она может быть меньше в три-пять раз. В океане плотность меняется не так сильно по сравнению с атмосферой (это не значит, что такие небольшие изменения не важны, например, для океанской циркуляции). Но даже если сравнивать плотности у поверхности, то плотность вод океана в 850 раз больше плотности атмосферного воздуха. Второй важной характеристикой является удельная теплоемкость, то есть количество тепла, которое надо затратить на нагревание единицы массы воздуха или воды. Для воздуха эта величина чуть выше 1000 Дж/(кг К), она достаточно постоянна, будучи слабо зависимой от температуры. Для океана удельная теплоемкость колеблется от 3800 до 4000 Дж/(кг К). Таким образом, можно грубо считать, что теплоемкость морской воды в четыре раза больше теплоемкости воздуха. Умножение 850 x 4 дает 3400 – очень грубую и заведомо заниженную оценку того, насколько океан более консервативен, чем атмосфера. Т. е. океану требуется в несколько тысяч раз больше времени, чем атмосфере для изменений своего термического состояния. Это, собственно, и определяет важнейшую роль океана в формировании глобального климата.

Вследствие потепления примерно 92,5% дополнительной энергии в земной климатической системе поглощается океаном, увеличивая его теплосодержание, что даже породило мем «глобальное потепление – это потепление океана («global warming is the ocean warming»). Современный рост глобальной температуры, в том числе и из-за антропогенного фактора, приводящего к ускоренному увеличению концентрации парниковых газов, является реакцией на радиационный дисбаланс в климатической системе Земли (так называемый *Earth Energy Imbalance*, ЕЕИ), связанный с превышением приходящей солнечной радиации над исходящей длинноволновой и отраженной коротковолновой радиацией на верхней границе атмосферы. Этот эффект показан в [2] – новой версии схемы баланса [3], основанной на наиболее точных оценках всех компонентов баланса энергии в атмосфере. За период 2000-2012 гг. дисбаланс приходящей радиации (341,3 Вт/кв. м) и уходящей коротковолновой и длинноволновой радиации (340,4 Вт/кв. м) составляет +0,9 Вт/кв. м, что отлично от оценок для периода с 1970 по 1990 гг., когда эта величина составляла около 0,2-0,3 Вт/кв. м, хотя она в значительной степени менее точна, чем оценки за последние десятилетия.

Как следствие, избыток тепла накапливается в системе Земли, приводя к наблюдаемому глобальному потеплению [4; 5]. Это, в свою очередь, приводит к дестабилизации глобальной климатической системы, основными последствиями которой являются потепление океана, таяние криосферы, повышение уровня моря, повышение влагосодержания воздуха, усиление экстремальных климатических явлений (SREX, [6]). Прогностические оценки, основанные на климатических моделях [5], предполагают, что глобальное потепление и связанные с ним изменения в ключевых климатических параметрах будут усиливаться в будущем. Это неявно предполагает и увеличение дисбаланса энергии в земной климатической системе. Поэтому вопрос о том, как перераспределяется эта энергия, и насколько точны оценки этого перераспределения, является ключевым для понимания климатических изменений.

Нагревание океана проявляется в увеличении его теплосодержания. Следствием медленного нагревания океана является то, что океан продолжает нагреваться даже в те относительно короткие периоды, когда тренды повышения глобальной температуры атмосферы уменьшаются, исчезают или имеют обратный знак. Показательным в этом смысле является период начала XXI-го столетия (между 1998 и 2011 гг.), когда в тренде глобальной температуры атмосферы отмечалось плато, однако океан продолжал нагреваться. Поэтому делать выводы об остановке глобального потепления

на основании краткосрочных тенденций в температуре воздуха нецелесообразно. Для изменения климата имеет значение повышение температуры от десятилетия к десятилетию, а не колебания темпов потепления в течение нескольких лет. «Пауза» в потеплении в начале XXI в. стала темой многочисленных спекуляций так называемых климатических скептиков, заявлявших о конце эпохи глобального потепления. Однако именно продолжающееся потепление океана в этот период наряду с возобновившимся трендом глобального потепления атмосферы дают ясное доказательство долгопериодного тренда в изменении глобальной температуры, связанного с повышением концентраций парниковых газов.

В этой связи встает важный вопрос – куда девается это тепло, или какие компоненты земной климатической системы нагреваются за его счет более всего? Если рассматривать атмосферу, то изменения нагрева за счет коротковолновой радиации очень малы. При сопоставлении различных компонентов коротковолнового радиационного потока тепла в атмосфере по данным разных авторов, хорошо видно, насколько устойчивыми остаются относительные оценки пропускания радиации и ее аккумуляции, меняясь, соответственно, в диапазонах 0,54-0,56 и 0,48-0,49, однако в сумме всегда давая больше единицы, что, собственно, и предполагает возникновение так называемой «потерянной энергии» (*missing energy*), о которой шла речь выше. Если верить этим оценкам, то возникает естественный вопрос: куда девается *missing energy*, и какой компонент климатической системы получает в основном эту энергию? Этими компонентами не могут быть атмосфера, криосфера и суша, поскольку их аккумулирующая способность довольно низка. Несмотря на возможные неопределенности оценок для каждого из них (составляющие не более 10-15%), суммарный вклад этих трех компонентов составляет от 2 до 4% от *missing energy*, основным стоком которой является океан.

Показательны в этом смысле оценки, демонстрирующие изменения теплового баланса на верхней границе атмосферы, в сопоставлении с изменениями теплосодержания Мирового океана для верхнего 700-метрового и 2000-метрового слоя, полученные по данным наблюдений (CTD + ARGO + AVISO) в период последних 15 лет. По этим оценкам видно, что изменения теплосодержания океана хорошо отслеживают дисбаланс на верхней границе атмосферы. Несоответствие может объясняться необходимостью учета изменений в глубоком океане (глубже 2000 метров), или же процессами энергообмена на границе океан-атмосфера.

Океан и междесятилетние изменения климата. Помимо роли глобального аккумулятора избыточного тепла океан играет также важную роль генератора так называемой собственной изменчивости, которая формирует отклик в атмосфере на масштабах меньших, чем долгопериодные климатические тренды. Одним из наиболее важных и малоисследованных феноменов собственной изменчивости в океане является так называемая Атлантическая мультидекадная осцилляция (АМО), представляющая собой периодические колебания температуры поверхности океана в Северной Атлантике, наиболее четко проявляющиеся в средних широтах с периодом 50-70 лет [7-12]. В большинстве климатических моделей АМО связана с изменениями Атлантической меридиональной циркуляции. Эта сильная мода природной изменчивости накладывается на долгопериодный тренд, связанный с глобальным потеплением, и существенно модифицирует пространственную изменчивость характеристик данного тренда. Это хорошо видно как по данным наблюдений, так и по данным климатического моделирования. В [10; 13; 14] показано, что АМО оказывает сильное влияние на европейский и североамериканский климат путем адвекции тепла и влаги из Северной Атлантики. Именно поэтому необходимо изучить и понять эту изменчивость, для того чтобы разделить антропогенный эффект и природные колебания системы [11].

Общая концепция предсказуемости климата и роли океана в климатических прогнозах следующая: на масштабах времени в несколько дней проблема предсказуемости является, в основном, проблемой начальных значений, где океан (вернее его изменения) играет малую роль. На более длинных масштабах предсказуемость климата зависит, в основном, от внешних факторов, влияющих на динамику климатической системы (например, концентрации парниковых газов) и океанских сигналов. В результате этого для масштабов времени от нескольких лет до нескольких десятилетий предсказуемость климата наихудшая, так как для них плохо изучены океанские сигналы (такие как АМО), которые могут существенно доминировать над антропогенными трендами. Таким образом, возможность декадных прогнозов климата сильно зависит от понимания и численного описания механизмов изменчивости океана. То есть, самая плохая предсказуемость на декадных масштабах (несколько лет – несколько десятилетий) совпадает с максимальным влиянием океана на климат.

Активная роль океана в процессах климатообразования на масштабе десятилетий была отмечена еще более 50 лет назад Бьеркнесом (1964). Он предположил, что характер крупномасштабного взаимодействия океана и атмосферы в средних широтах Северной Атлантики меняется в зависимости от временных масштабов: атмосфера регулирует короткопериодные изменения температуры поверхности океана, а долгопериодные изменения температуры поверхности океана и атмосферы регулируются самим океаном. В течение последних десятилетий предположение Бьеркнеса было проверено с использованием как моделей [15; 16], так и данных наблюдений [10]. Однако детальное исследование механизмов формирования внутренней изменчивости океана связано с ролью синоптической и мезомасштабной динамики вод.

Роль мезомасштабной и синоптической динамики в атмосфере и в океане очень различна. Если рассмотреть пространственное распределение ветра в атмосфере в произвольно выбранный момент времени, то общая структура средней крупномасштабной циркуляции будет маскироваться синоптическими движениями, представленными, в основном, перемещением вихревых образований, доминирующими над крупномасштабными (в основном, зональными) переносами, что особенно ярко проявляется в средних широтах. При этом в океане крупномасштабные переносы хорошо видны даже для модельной картины в очень высоком разрешении, позволяющей отслеживать динамику океанских вихрей. Это показывает, что пространственные характеристики мезомасштабной динамики в атмосфере и в океане очень различны. В океане мезомасштабная изменчивость не может быть описана по аналогии с синоптической в атмосфере в терминах циклонов и их режимов. В атмосфере меридиональный перенос тепла (МПТ), особенно в умеренных широтах, осуществляется синоптическими вихрями, в то время как в океане МПТ обеспечивается в основном крупномасштабными течениями. Такая, на первый взгляд, «малая» роль мезомасштабных океанских вихрей в общей динамике океана явилась причиной того, что вихреразрешающие модели океана развивались значительно медленнее, чем высокоразрешающие модели атмосферы. Это также подчеркивает очень разную роль синоптических и мезомасштабных вихрей в динамике атмосферы и океана несмотря на то, что процессы их образования для атмосферы и океана очень похожи.

Так как в океане течения у западных побережий в основном представлены нестационарными вихрями синоптического масштаба и меандрами, то роль этих вихрей в общей циркуляции океана намного более сложна и менее изучена, чем роль циклонов в атмосфере. Важно отметить, что мезомасштабные и синоптические океанские вихри могут существенно влиять на межгодовую и долгопериодную изменчивость океанской циркуляции и модулировать сильную низкочастотную крупномасштабную изменчивость. Эта

изменчивость хорошо видна в измерениях температуры поверхности океана [17], гидрографии [18] и альтиметрии уровня поверхности океана [19]. Также она отчетливо прослеживается в структурных изменениях продолжений струйных течений и в соответствующих зонах рециркуляции главных течений у западных побережий, таких как Гольфстрим и Куроиси. Вихреразрешающие модели океана с сезонным форсингом показывают внутреннюю низкочастотную изменчивость мезомасштабной динамики океана [20], переноса тепла вихрями [21], высоты уровня моря [22], течений у западных побережий [23] и меридиональной циркуляции [24], демонстрируя важную роль океанских мезомасштабных вихрей.

Таким образом, роль вихрей в океане и атмосфере существенно различна. Океанские мезомасштабные вихри, играя, на первый взгляд, гораздо меньшую роль в глобальной динамике океана, как раз и формируют долгопериодную изменчивость Мирового океана на масштабах десятилетий. Другими словами, именно мезомасштабная динамика океана, будучи проинтегрированной во времени, обеспечивает формирование собственных частот, препятствующих получению устойчивых прогностических оценок климатических изменений.

Наблюдаемые последствия климатических изменений. Последствия климатических изменений в известной степени трудноотделимы от самих климатических изменений в силу того, что многие включают обратные связи, влияющие на них. Учитывая эту оговорку, необходимо отметить следующие важные следствия климатических изменений для природных процессов. Во-первых, это существенные изменения частоты и интенсивности экстремальных климатических событий, в первую очередь, осадков и связанных с ними наводнений, а также засух. Во многих районах мира, в основном, в средних широтах и на территории России, средние величины осадков изменяются не очень сильно, иногда остаются достаточно устойчивыми, однако близкое по параметрам месячное количество осадков имеет тенденцию выпадать в течение нескольких экстремальных дней, что и приводит к сильным наводнениям. Кроме того, повышение средней глобальной температуры, составляющее (см. выше) в пределах одного градуса за последние десятилетия, существенно влияет на смещение циклонических траекторий и, следовательно, на вынос циклонами влаги с океанов на континенты, что приводит к увеличению увлажненности в одних регионах и повышению засушливости в других. Еще одним важным фактором является влияние изменений климата на состояние вечномерзлых грунтов. Сокращение площади вечной мерзлоты в России составляет за последние десятилетия сотни тысяч кв. км, при этом еще большее сокращение происходит для сезонно-мерзлых грунтов. Это напрямую влияет на инфраструктуру на многолетней мерзлоте. Устойчивость ее в течение многих десятилетий гарантировалась устойчивостью самой мерзлоты, и поэтому таяние подрывает устойчивость зданий, дорог, причальных сооружений и т. д. Рассматривая природные комплексы, надо отметить прогрессирующее опустынивание степных ландшафтов, изменение характеристик плодородности почв в различных природных зонах, возможный рост территории болот (и связанный с этим рост эмиссии метана из болот), а также изменения лесных комплексов.

Что касается океана, важным следствием изменений климата является существенное уменьшение площади Арктических льдов [25]. В последние десятилетия отмечается устойчивое уменьшение общего количества льда в Арктическом бассейне, связанное с глобальным потеплением. За последние сорок с лишним лет (с 1980 г.) сентябрьская площадь арктических льдов (так называемый летний минимум) уменьшилась с 7,7 до 4,5 млн кв. км, то есть мы потеряли примерно 40% летнего ледового покрова. Зимой это уменьшение составляет около 20%. Это является одним из механизмов формирования более сильных изменений глобального климата

в Арктике по сравнению с другими районами земного шара за счет обратных связей между альбедо и температурой и притока тепла из Северного ледовитого океана в атмосферу. Прогностические оценки Межправительственной группы экспертов по изменениям климата и Национального доклада об изменениях климата в России показывают, что эта тенденция будет сохраняться в ближайшие десятилетия практически при всех сценариях экономического развития. Это существенно влияет на навигационную обстановку на Северном морском пути (СМП), являющемся перспективной транспортной артерией, на первый взгляд, экономически более привлекательной, чем транзит из Юго-восточной Азии в Европу через Индийский океан.

Однако к перспективам использования СМП для транзитных перевозок грузов, равно как и для перевозок с российского Дальнего Востока на Европейскую часть РФ следует относиться с осторожностью. Прогнозные оценки, например, показывают, что к 2050 г. при сохранении текущих тенденций развития экономики, характеризующихся наиболее интенсивным антропогенным воздействием на климатическую систему (business as usual), можно ожидать полного исчезновения льда в Арктическом бассейне в летний сезон, а при умеренных сценариях – свободного ото льда СМП также в летний сезон. Однако в прогнозных оценках речь идет о возникновении периодов продолжительностью два-три года, когда это будет наблюдаться, то есть такие периоды будут перемежаться с периодами с относительно высокой ледовитостью. Это, кстати, и сейчас наблюдается, например, рекордные отрицательные аномалии 2007 и 2012 гг. перемежались относительно высокой ледовитостью в 2014 и 2021 гг. Во-вторых, метрикой «отсутствия льда» в климатических прогнозах является концентрация льда на уровне 15%, то есть все равно плавающий лед будет присутствовать.

Еще одним важным следствием изменений климата является подъем уровня океана, который рассматривается как одно из наиболее уверенных доказательств глобального потепления. Рост уровня Мирового океана происходил все последнее столетие, а в последние десятилетия он значительно усилился. Начиная с 1993 г., когда уровень океана стал измеряться высокоточными спутниковыми системами, его ежегодный прирост составил 3,1 мм, что привело к повышению уровня примерно на 10 см за последние 30 лет [25].

Двумя основными причинами глобального повышения уровня океана являются тепловое расширение, вызванное потеплением океана (поскольку вода расширяется при нагревании) и усиление таяния наземных льдов – континентальных ледников и ледниковых щитов. Оценки относительной роли двух этих процессов колеблются от 50/50 до 60/40 в пользу таяния континентальных льдов, однако относительная роль термического расширения океанов несколько увеличилась в последнее десятилетие. При продолжающемся потеплении океана и атмосферы уровень моря, вероятно, будет повышаться в будущем более высокими темпами, чем в текущем столетии. Повышение уровня моря в определенных местах может быть больше или меньше, чем в среднем по океану, например, из-за эффектов региональной океанской циркуляции. Наиболее сильный рост уровня в последние десятилетия отмечается в западной экваториальной области Тихого океана (более 7 см за последние два десятилетия), тогда как в восточной области Тихого океана отмечается даже понижение уровня на 2-3 см за последние 22 года.

Рост уровня океана представляет огромный вызов для прибрежных районов земного шара, которые отличаются исключительно высокой плотностью населения – здесь проживает более половины населения Земли, производящего более 70% валового мирового продукта. Более того, прибрежные зоны глубоко интегрированы в экономику даже сильно удаленных от побережья районов, и стрессовые воздействия на береговые зоны серьезно влияют на экономику и условия жизни вдали от них. Главными угрозами для

прибрежных районов являются повышение уровня моря и изменения интенсивности штормовой активности, приводящие к наводнениям и размыву берегов. Особую опасность рост уровня океана представляет для низкорасположенных островных территорий, в частности, для тропических островов Тихого океана, значительные области которых находятся в нескольких сантиметрах выше уровня моря. Повышение среднего уровня моря одновременно повышает опасность и экстремальных подъемов уровня, например, штормовых нагонов, которые будут развиваться на фоне более высоких отметок среднего уровня. Рост уровня моря отражается также и на водных ресурсах, и экологическом балансе прибрежных районов, включая как прибрежные морские акватории, так и прилегающие к ним части суши. В этой связи особенно уязвимы экосистемы прибрежных низменностей (соленые марши и мангры), поскольку они располагаются на уровне всего нескольких сантиметров над уровнем моря. Эти низменности – местообитание многих видов животных и растений, они играют важную роль в накоплении питательных веществ. Более того, именно здесь происходит интенсивная хозяйственная деятельность, охватывающая сотни миллионов человек, включающая, в частности, строительство, создание и обслуживание транспортной инфраструктуры, высокотехнологичные отрасли экономики, туризм.

На фоне общего повышения уровня моря происходит увеличение частоты и интенсивности экстремальных подъемов уровня, а также интенсивности штормов, что влияет на навигацию и морскую деятельность в прибрежной зоне и открытом океане; в частности, в зимний период отмечается усугубление условий, способствующих обледенению судов и платформ, в первую очередь, в Арктическом бассейне, а также удлинение периодов с неблагоприятными условиями для навигации. Наконец, климатические изменения существенным образом влияют на экосистемы океана, в том числе, в результате так называемого окисления океана. Это приводит к смещению ареалов традиционного вылова рыб (например, в Баренцевом море большая часть арктических видов уже вытеснена атлантическими видами), а также к исчезновению отдельных видов в промысловом объеме.

Роль океана в балансе парниковых газов в атмосфере. Главной причиной наблюдаемых климатических изменений в течение последних 170 лет являются выбросы в атмосферу климатически активных (или, как их иногда называют, парниковых) газов, основными из которых являются двуокись углерода (CO_2), метан (CH_4) и закись азота (N_2O). Воздействие этих газов, которые называют хорошо перемешанными долгоживущими газами, связано с тем, что они препятствуют уходу длинноволновой солнечной радиации из климатической системы. Дополнительный эффект также создают галогенные газы (CFCs, HCFCs, HFCs, PFCs, SF_6), влияние которых на климат несколько меньше. Источниками эмиссии климатически активных газов в атмосферу являются, во-первых, антропогенная деятельность человека, во-вторых, естественные источники, связанные с биогеохимическими процессами в земной климатической системе. Антропогенное влияние на эмиссию климатически активных газов создается выработкой энергии, транспортом, сельским хозяйством, различными производствами, относительная роль которых в эмиссии может меняться от страны к стране, хотя главным источником эмиссии в большинстве стран является производство энергии. Еще одним способом антропогенного влияния на эмиссию климатически активных газов является изменение ландшафтов и практики землепользования. Атмосферные концентрации трех главных парниковых газов, выросли, начиная с доиндустриальной эпохи: CO_2 – на 46%, CH_4 – на 157% и N_2O – на 22%.

В этом смысле океан является важнейшим и мощнейшим регулятором содержания CO_2 в атмосфере. Наряду с экосистемами суши, океан поглощает значительную часть

углекислоты. В Шестом Оценочном докладе МГЭИК было показано, что при реализации сценария «business as usual» (SSP1-8.5) экосистемы суши и океана могут «справиться» только с 38% выбросов парниковых газов в атмосферу. При реализации сценария немедленного и резкого сокращения выбросов (SSP1-1.9) эта величина составляет 70%. Иными словами, для достижения углеродной нейтральности 62% выбросов в первом случае и 30% во втором должны быть утилизированы как применением новых промышленных технологий, так и внедрением экосистемных технологий. Учитывая практическую невозможность реализации в полном объеме сценария SSP1-1.9, мы должны ориентироваться, по крайней мере, на промежуточные сценарии SSP1-2.6 или SSP2-4.5, предполагающие необходимость утилизации промышленными и экосистемными технологиями соответственно 35% и 46% выбросов парниковых газов.

Обмен газа между атмосферой и океаном – это физико-химический процесс, который регулируется разницей в концентрациях газа между воздухом и водой и коэффициентом обмена, который определяет, насколько быстро молекулы газа могут перемещаться через границу океан-атмосфера. В этом смысле поток газов между океаном и атмосферой является турбулентным и похож на процесс обмена турбулентными потоками тепла и влаги. Океан играет огромную роль в глобальном балансе CO_2 и других климатически активных газов и является их глобальным регулятором. CO_2 – это растворимый газ, который растворяется в океанах и поглощается морскими растениями, в частности, фитопланктоном. В ходе естественных циклов CO_2 абсорбируется океаном из атмосферы в более прохладных и более биологически активных областях и высвобождается обратно в атмосферу в более теплых и менее биологически активных районах. Наиболее интенсивное поглощение CO_2 океаном из атмосферы происходит в Северной Атлантике. Суммарный баланс на сегодня таков, что океан является нетто-поглотителем CO_2 , обеспечивая около 30% глобального поглощения двуокиси углерода.

Наблюдаемое поглощение океаном антропогенного CO_2 является, прежде всего, физической реакцией на повышение его концентрации в атмосфере. Когда парциальное давление газа увеличивается в атмосфере над водным пространством, газ начинает диффундировать в воду до тех пор, пока парциальные давления на границе раздела воздуха не уравниваются. Однако, поскольку глобальный углеродный цикл тесно связан с физической климатической системой, между двумя системами существует несколько сильных обратных связей. Например, увеличение объема CO_2 изменяет климат, что, в свою очередь, влияет на циркуляцию океана и, следовательно, на поглощение CO_2 океаном. Так, нагревание океана ведет к расширению областей теплых и малопродуктивных вод и сокращению областей относительно холодных вод, что приводит к уменьшению поглощающей способности океана. Еще одним фактором, влияющим на процесс поглощения CO_2 океаном, является штормовая активность. С потеплением климата может усилиться интенсивность штормов, а их усиление, и, как следствие, скорость резкого роста ветровых волн и их обрушения, приводит к локальному увеличению потока CO_2 из океана в атмосферу вне зависимости от температуры. Таким образом, в ходе наблюдаемых климатических изменений океан, хоть и очень медленно, ослабляет свою роль, как поглотителя CO_2 . Изменения в морских экосистемах в результате увеличения выбросов CO_2 и/или изменения климата также могут привести к изменениям в обмене CO_2 между атмосферой и морем. Эти обратные связи могут изменить роль океанов в поглощении атмосферного CO_2 , что очень затрудняет прогнозирование того, как углеродный цикл океана будет работать в будущем.

Важным следствием поглощения океаном CO_2 является закисление, которое существенно влияет на океанскую биоту и экосистемы. Поэтому, будучи мощным поглотителем двуокиси углерода, океан формирует процессы, опасные для многих

экосистем. Закисление океана уже влияет на многие виды, особенно на такие организмы, как устрицы и кораллы, которые образуют твердые раковины и скелеты, поглощая кальций и карбонат из морской воды. По мере того, как закисление океана увеличивается, все меньше карбонатных ионов остается доступно для создания и поддержания такими организмами своих раковин и скелетов, что может привести к тому, что они могут начать растворяться.

Наблюдения потоков CO_2 между океаном и атмосферой более технически сложны и гораздо более дорогостоящи, чем наблюдения за потоками тепловой энергии. Сегодня количество наблюдений за потоками CO_2 на поверхности океана в десятки раз меньше в сравнении с количеством наблюдений за другими океанскими параметрами. Развитие спутниковых методов позволяет получить косвенные оценки потоков, однако для валидации спутниковых измерений требуются прямые наблюдения, которые пока существуют лишь в ограниченном количестве. Как следствие, наши представления о потоках CO_2 на границе океан-атмосфера на порядок менее точные, чем о потоках тепловой энергии.

Необходимость мониторинга океана. Описанные климатические изменения Мирового океана требуют организации долговременного мониторинга всех термодинамических и биогеохимических характеристик океана. В настоящее время в рамках Важнейшего инновационного проекта государственного значения, направленного на создание единой национальной системы мониторинга климатически активных веществ, и в рамках Федеральной научно-технической программы в области экологического развития Российской Федерации и климатических изменений на 2021-2030 гг. система такого мониторинга строится в рамках отдельного консорциума. Задача консорциума – сформировать систему мониторинга климатических изменений, гидрофизических и биогеохимических характеристик, а также потоков энергии и климатически активных веществ на основе использования буев, морских обсерваторий, судовых и береговых наблюдений, обеспечивающую оперативное получение достоверных и общедоступных данных о динамике климатических характеристик и потоков парниковых газов, включая оперативное формирование ретроспективных анализов (реанализов), в ключевых районах Мирового океана, морях и береговых областях Российской Федерации, представляющих собой долговременные сеточные массивы всех океанских характеристик с разрешением не ниже 10 км по пространству и 1 сут. по времени.

Реализация работ консорциума позволит создать интегрированные системы мониторинга субполярной Северной Атлантики и северо-западной части Тихого океана с целью уменьшения неопределенностей в оценках роли океана в изменениях климата и балансе климатически активных газов; построить многокомпонентные системы мониторинга морей России с учетом региональных особенностей для обеспечения эффективности адаптационных решений; а также создать оперативные реанализы состояния Мирового океана и морей России, включая характеристики потоков энергии и климатически активных газов, объединяющие возможности различных типов данных и моделирования.

Это необходимо, поскольку в России сегодня отсутствуют как интегрированные системы наблюдений за состоянием океана, морей и прибрежных областей, так и модели с системами усвоения данных и, как следствие, долговременные реанализы океана и морей. В современных условиях мы также отрезаны от зарубежных реанализов и потоков данных для усвоения. Это приводит к большим (до 70%) неопределенностям в оценке роли океана и морей в формировании климата и балансе парниковых газов, делая невозможным принятие обоснованных адаптационных решений, в том числе, для развития всех отраслей экономики, связанных с океаном и береговыми областями.

Объективные данные о состоянии ключевых районов Мирового океана и морей России на основе измерений буев, спутников и судов, обеспечивающие потоки информации для усвоения модельными системами, созданными в ходе функционирования консорциума, позволят проводить верификацию моделей земной системы и региональных климатических моделей, что приведет к улучшению национальных систем прогнозирования климата. Эти данные будут использоваться для создания национальных измерительных комплексов для океанов и морей, а также для разработки национальных систем дистанционного мониторинга климатически активных веществ, что позволит устранить зависимость национальных систем мониторинга от ЕС и США.

Верифицированные оценки долгопериодных изменений динамики океана, потоков энергии океан-атмосфера, поглощения и эмиссии парниковых газов в Мировом океане и морях России на основе реанализов будут использоваться для получения оперативных оценок состояния морских систем, включаться в информационные базы при разработке сценариев развития экономики и использоваться для обоснования адаптационных мероприятий в прибрежных областях и береговых зонах.

Литература / References

- Gulev S.K., Thorne P.W., Ahn J., Dentener F.J., Domingues C.M., Gerland S., Gong D., Kaufman D.S., Nnamchi H.C., Quaa J., Rivera J.A., Sathyendranath S., Smith S.L., Trewin B., von Schuckmann K., Vose R.S. *Changing State of the Climate System. In Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmoite V., Zhai P., Pirani A., Connors S.L., Péan C., Berger S., Caud N., Chen Y., Goldfarb L., Gomis M.I., Huang M., Leitzell K., Lonnoy E., Matthews J.B.R., Maycock T.K., Waterfield T., Yelekçi O., Yu R., Zhou B. (eds.)]. Cambridge University Press. Cambridge. United Kingdom and New York. NY, USA. Pp. 287-422. DOI:10.1017/9781009157896.004.*
- Trenberth K.E. *Understanding climate change through Earth's energy flows // Journal of the Royal Society of New Zealand. 2020. DOI:10.1080/03036758.2020.1741404.*
- Trenberth K.E., Fasullo J.T. *Tracking Earth's energy: From El Niño to global warming // Surveys in geophysics. 2012. No. 33 (3-4). Pp. 413-426.*
- Hansen J., Sato M., Kharecha P., von Schuckmann K. *Earth's energy imbalance and implications // Atmospheric Chemistry and Physics. 2011. No. 11. Pp. 13421-13449. URL: https://doi.org/10.5194/acp-11-13421-2011*
- 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 [Stocker T.F., Qin D., Plattner G.-K., Tignor M., Allen S.K., Boschung J., Nauels A., Xia Y., Bex V., Midgley P.M. (eds.)]. Cambridge University Press. Cambridge. United Kingdom and New York. NY, USA. 1535 p.*
- von Schuckmann K., Palmer M.D., Trenberth K.E., Cazenave A., Chambers D., Champollion N., Wild M. *An imperative to monitor earth's energy imbalance // Nature Climate Change. 2016. No. 6 (2). Pp. 138-144. DOI:10.1038/nclimate2876.*
- Latif M. et al. *Reconstructing, monitoring, and predicting multidecadal-scale changes in the North Atlantic thermohaline circulation with sea surface temperature // Journal of Climate. 2004. No. 17. Pp. 1605-1614.*
- Latif M., Boning C., Willebrand J., Biastoch A., Dengg J., Keenlyside N., Schweckendiek U. *Is the thermohaline circulation changing? // Journal of Climate. 2006. No. 18. Pp. 4631-4637.*
- Knight J.R., Allan R.J., Folland C.K., Vellinga M., Mann M.E. *A signature of persistent natural thermohaline circulation cycles in observed climate // Geophysical Research Letters. 2005. No. 32. DOI:10.1029/2005GL024233.*
- Gulev S.K., Latif M., Keenlyside N., Park W., Koltermann K.P. *North Atlantic Ocean control on surface heat flux on multidecadal timescales // Nature. 2013. No. 499. Pp. 464-467. DOI:10.1038/nature12268.*
- Gulev S.K., Latif M. *The origins of a climate oscillation // Nature. 2015. No. 521. Pp. 428-430. DOI:10.1038/521428a.*
- McCarthy G.D., Haigh I.D., Hirschi J.J., Grist J.P., Smeed D.A. *Ocean impact on decadal atlantic climate variability revealed by sea-level observations // Nature. 2015. No. 521 (7553). Pp. 508-510. DOI:10.1038/nature14491.*
- Sutton R.T., Hodson D. *Climate Atlantic Ocean forcing of North American and European summer // Science. 2005. No. 309. Pp. 115-118.*
- Kushnir Y. et al. *Atmospheric GCM response to extratropical SST anomalies: synthesis and evaluation // Journal of Climate. 2002. No. 15. Pp. 2233-2256.*
- Delworth T.L., Mann M.E. *Observed and simulated multidecadal variability in the northern hemisphere // Climate Dynamics. 2000. No. 16 (9). Pp. 661-676. DOI:10.1007/s003820000075.*
- Latif M., Boning C., Willebrand J., Biastoch A., Dengg J., Keenlyside N., Schweckendiek U. *Is the thermohaline circulation changing? // Journal of Climate. 2006. No. 18. Pp. 4631-4637.*
- Hansen D., Bezdek H. *On the nature of decadal anomalies in North Atlantic sea surface temperature // Journal of Geophysical Research. 1996. No. 101. Pp. 8749-8758.*
- Qiu B., Joyce T. *Interannual variability in the mid- and low-latitude western North Pacific // Journal of Physical Oceanography. 1992. No. 22. Pp. 1062-1079.*

19. Qiu B., Chen S. Variability of the Kuroshio extension jet, recirculation gyre, and mesoscale eddies on decadal time scales // *Journal of Physical Oceanography*. 2005. No. 35. Pp. 2090-2103.
20. Penduff T., Juza M., Barnier B., Zika J., Dewar W.K., Treguier A.-M., Molines J.-M., Audiffren N. Sea Level Expression of Intrinsic and Forced Ocean Variabilities at Interannual Time Scales // *Journal of Climate*. 2011. No. 24. Pp. 5652-5670. DOI:10.1175/JCLI-D-11-00077.1.
21. Hall N., Barnier B., Penduff T., Molines J.-M. Interannual variation of Gulf Stream heat transport in a high resolution model forced by reanalysis data // *Climate Dynamics*. 2004. No. 23. Pp. 341-351.
22. Cabanes C., Huck T., Colin de Verdiere A. Contributions of wind forcing and surface heating to interannual sea level variations in the Atlantic Ocean // *Journal of Physical Oceanography*. 2006. No. 36. Pp. 1739-1750.
23. Taguchi B., Xie S., Schneider N., Nonaka M., Sasaki H., Sasai Y. Decadal variability of the Kuroshio extension: Observations and an eddy-resolving model hindcast // *Journal of Physical Oceanography*. 2007. No. 20. Pp. 2357-2377.
24. Biastoch A., Boning C., Lutjeharms J. Agulhas leakage dynamics affects decadal variability in Atlantic overturning circulation // *Nature*. 2008. No. 456. Pp. 489-492.
25. IPCC, 2021. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte V., Zhai P., Pirani A., Connors S.L., Péan C., Berger S., Caud N., Chen Y., Goldfarb L., Gomis M.I., Huang M., Leitzell K., Lonnoy E., Matthews J.B.R., Maycock T.K., Waterfield T., Yelekçi O., Yu R., Zhou B. (eds.)]. Cambridge University Press. Cambridge. United Kingdom and New York. NY, USA. In press. DOI:10.1017/9781009157896.



Статья поступила в редакцию 15.06.2023. Статья принята к публикации 05.07.2023.

Для цитирования: С.К. Гулев. Глобальные изменения климата и мировой океан // Проблемы прогнозирования. 2023. № 6 (201). С. 25-36.
DOI: 10.47711/0868-6351-201-25-36

Summary

GLOBAL CLIMATE CHANGE AND THE OCEANS

S.K. GULEV, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, P.P. Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
Scopus Author ID: 7004415966

Abstract: The article analyzes the role of the ocean in climate change. The effects associated with the accumulation of anthropogenic heat by the ocean, as well as the formation of the ocean's own changes on a scale of decades, are discussed. The flows of climatically active gases between the ocean and the atmosphere are considered. It is shown that, being the most conservative component of the climate system, the World Ocean absorbs ~92% of excess heat entering the system as a result of anthropogenic activity. This determines approximately 50-60% of the contribution to the rise in the level of the World Ocean due to the steric factor. It is also substantiated that the ocean is the only component of the climate system that has internal (intrinsic) variability modes with long (from a decade to several decades) time scales. These modes of variability (for example, the Atlantic Multidecadal Oscillation) form responses in the atmosphere (during the processes of interaction at the ocean-atmosphere interface), whose superposition with global trends significantly reduces the accuracy of climate forecasts. Finally, it is shown that the oceans and seas are the most powerful net absorbers of climatically active gases, primarily CO₂. With the warming of the climate (and the simultaneous warming of the ocean and seas), the role of the ocean as a CO₂ sink is slowly weakening. Moreover, with an increase in storm activity in the oceans and seas, this role also weakens, since storm activity leads to an increase in emissions. Thus, global and regional balances of greenhouse gases cannot be reliably estimated without taking into account the role of the ocean.

Keywords: World Ocean, climate change, heat balance, sea level rise, greenhouse gas fluxes, monitoring system.

Received 15.06.2023. Accepted 05.07.2023.

For citation: S.K. Gulev. Global Climate Change and the Oceans // Studies on Russian Economic Development. 2023. Vol. 34. No. 6. Pp. 738-745.
DOI: 10.1134/S1075700723060060