

СОВРЕМЕННЫЕ КЛИМАТОУСЛОВЛЕННЫЕ ГЛОБАЛЬНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ОКЕАНА И КРИОСФЕРЫ: СПЕЦИАЛЬНЫЙ ДОКЛАД МЕЖПРАВИТЕЛЬСТВЕННОЙ ГРУППЫ ЭКСПЕРТОВ ПО ИЗМЕНЕНИЮ КЛИМАТА (МГЭИК) 2019 ГОДА

С.М. Семенов^{1), 2), 3)}, Е.Д. Иголкина¹⁾*

¹⁾ Институт глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля, 107258, Москва, ул. Глебовская, д. 206; **SergeySemenov1@yandex.ru*

²⁾ Институт географии РАН, 119017, Москва, Старомонетный пер., д. 29

³⁾ Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», 101000, г. Москва, ул. Мясницкая, д. 20

Реферат. В последнее десятилетие новые результаты научных исследований показали, что наблюдаемые изменения в состоянии Мирового океана и криосферы связаны с глобальным потеплением, или же оно обостряет воздействие иных факторов неклиматической природы. Эти результаты суммированы и обобщены в «Специальном докладе МГЭИК об океане и криосфере в условиях меняющегося климата» 2019 г. При подготовке доклада авторы МГЭИК использовали новые методы характеристики и визуализации рисков и неопределенностей, в разработке которых был достигнут существенный прогресс в последние годы. В статье кратко представлены эти методы, структура доклада и его основные естественнонаучные выводы и заключения.

Ключевые слова. Глобальный климат, изменения, последствия, океан, криосфера, специальный доклад.

Введение

В конце XX века человечество осознало масштабы своего влияния на климат. Изменение глобального климата надежно установлено путем анализа данных мониторинга глобального климата и показано, что большая часть этого изменения объясняется антропогенным воздействием на климатическую систему Земли. После заключения в 1992 г. Рамочной конвенции ООН об изменении климата (РКИК ООН, 1992) предотвращение неблагоприятных изменений глобального климата стало одним из основных вопросов международной политики. Напомним, что в статье 1 п. 3 Конвенции дано следующее определение: «Климатическая система означает совокупность атмосферы, гидросферы, биосферы и геосферы и их взаимодействие». Это взаимодей-

ствии – обмен веществом и энергией, главным первичным источником которой на Земле является солнечное излучение, – и порождает климат.

Гидросфера, важнейшая часть климатической системы. Она представлена, прежде всего, водами морей и океанов, поверхностными и подземными водами на суше, а также компонентами природных систем, содержащих воду в твердой форме – снег, лед. Общим термином для них является «криосфера». К ней относятся следующие компоненты земной системы на поверхности суши и океанов/морей или же под ней: снежный покров, ледники, ледниковые покровы, шельфовый лед, айсберги, морской лед, озерный и речной лед, многолетняя мерзлота и замерзшая почва. Многолетняя мерзлота представляет собой “землю (почву или скальный грунт с включениями льда и органического вещества), температура которой остается не более 0°C в течение двух последовательных лет” (IPCC, 2014, Glossary).

Все элементы гидросферы связаны глобальным гидрологическим циклом: испарение воды с поверхности вод и суши, горизонтальный и вертикальный перенос влаги атмосферными воздушными потоками, выпадение осадков и пополнение массы воды в реках и озерах и снега на суше, пополнение массы льда в ледниках, ледниковых покровых и морском ледовом покрове; затем – перенос водных масс реками и при «течении» льда ледников и ледовых покровов и, наконец, поступление воды снова в моря и океаны. Солнце обеспечивает энергией этот круговорот воды в климатической системе.

Мировой океан и криосфера – крупные составляющие земной системы. Поверхность океана – почти 71% земной поверхности; он содержит более 96% мировых запасов воды (<https://geographyofrussia.com/vody-mirovogo-okeana/>). Площадь современного оледенения составляет около 11% площади суши (<https://bigenc.ru/geography/text/2136983>). Современные изменения глобального климата оказывают заметное воздействие на океан и криосферу, их структуру, динамику, потоки вещества и энергии. Информация об этих изменениях важна не только с научной точки зрения, но и практически. Ведь океан является источником ценных ресурсов (минеральных, энергетических, пищевых), предоставляет экономически эффективные возможности транспортных перевозок, способен поглощать атмосферный CO₂ (смягчая, тем самым антропогенное усиление парникового эффекта), играет существенную роль в сохранении биоразнообразия. Состояние криосферы также имеет серьезное практическое значение: на полярных морях от него зависит продолжительность навигации, безопасность перевозок, возможности добычи полезных ископаемых и рыболовства. Ледниковый сток многих горных ледниковых систем (например, в Гималаях) очень важен для водных ресурсов нижележащих регионов, особенно для сельского хозяйства. Криосфера в горах формирует возможности для горнолыжного спорта.

Многие из этих вопросов среди прочих обсуждались в научных докладах Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) в последние десятилетия. Однако по мере накопления информации стало ясно, что в цикле Шестого оценочного доклада МГЭИК (Гладильщикова, Семенов, 2017) целесообразно подготовить отдельный документ – «Специальный

доклад МГЭИК об океане и криосфере в условиях меняющегося климата» (IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate). Решение о подготовке такого доклада было принято в апреле 2016 г. на 43-й сессии МГЭИК. Доклад был принят на 51-й сессии МГЭИК в сентябре 2019 г.

Цель этой статьи – кратко представить:

– структуру доклада и некоторые методологические особенности представления выводов и заключений доклада, относящиеся к характеристике и визуализации неопределенности оценок рисков, и

– основные естественнонаучные выводы и заключения доклада, следуя «Резюме для политиков» (IPCC, 2019), касающиеся изменения физических процессов и их воздействия на экосистемы, экосистемные услуги и человека.

Общая характеристика доклада

«Специальный доклад МГЭИК об океане и криосфере в условиях меняющегося климата» состоит из 6 глав:

- 1) Структура и контекст доклада (Framing and Context of the Report);
- 2) Высокогорье (High Mountain Areas);
- 3) Полярные регионы (Polar regions);
- 4) Повышение уровня моря и последствия для низкорасположенных островов, берегов и сообществ (Sea Level Rise and Implications for Low Lying Islands, Coasts and Communities);
- 5) Изменяющийся океан, морские экосистемы и зависимые сообщества (Changing Ocean, Marine Ecosystems, and Dependent Communities);
- 6) Экстремумы, резкие изменения и управление рисками (Extremes, Abrupt Changes and Managing Risks).

В соответствии с традициями МГЭИК в докладе также имеются «Резюме для политиков» (РП) и «Техническое резюме» (ТР). Последнее – объединение исполнительных резюме (ИР) глав с некоторыми основными иллюстрациями. Основные выводы и заключения доклада, приведенные в «Резюме для политиков» (IPCC, 2019), снабжены оценками их неопределенности в соответствии с принятыми в МГЭИК подходами (Семенов и др., 2019). Доклад снабжен «Глоссарием», в котором пояснены основные используемые научные понятия.

Доклад был подготовлен в 2016-2019 гг. 104 авторами и редакторами-рецензентами из 36 стран, 19 из которых являются развивающимися странами или странами с переходной экономикой. В целом в докладе содержатся ссылки на 6981 публикацию. Проекты доклада получили 31 176 комментариев от 80 стран. В подготовке доклада участвовали и российские эксперты: авторы – А.А. Екайкин (Арктический и антарктический научно-исследовательский институт) и С.С. Кутузов (Институт географии РАН), а также редактор-рецензент О.А. Анисимов (Государственный гидрологический институт). В организации работы над докладом принимал участие член Бюро МГЭИК С.М. Семенов (Институт глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля).

В ходе подготовки доклада было проведено четыре совещания ведущих авторов. Последнее, заключительное состоялось в Казани (Российская Федерация), в марте 2019 г. В его организации участвовали Т.М. Дмитриева (Росгидромет), Д.К. Нургалиев, С.Ю. Селивановская и Ю.П. Переведенцев (Казанский (Приволжский) федеральный университет).

Характеризация и визуализация неопределенности оценок и использование понятия риска в докладе

Все оценки наблюдаемых и ожидаемых изменений климата и их последствий для природных и социально-экономических систем, представленные в докладах МГЭИК – результат синтеза информации, имеющейся в научных публикациях. Эта информация – количественные данные или же качественные оценки – характеризуется определенным уровнем надежности.

Авторы докладов МГЭИК, в частности данного специального доклада, используют для этого две шкалы: правдоподобие (likelihood) и достоверность (confidence). Причем последний термин понимается не в традиционном математическом, статистическом смысле, а скорее как «надежность» (trustworthiness). Применение шкалы правдоподобия соответствует традиционной статистике, где используются обычные характеристики выборки и соответствующие статистические критерии. Использование шкалы достоверности связано с ее экспертными оценками. Для какого-либо утверждения (вывода, заключения) их дают авторы докладов МГЭИК, основываясь на объеме свидетельств, представленных в научной литературе, и их согласии. Чем больше объем свидетельств и их согласие, тем выше оценка надежности утверждения – см. рис. 1. Эти рекомендации даны в руководстве МГЭИК (Mastrandrea et al., 2010), а их подробное обсуждение приведено в (Семенов и др., 2019).

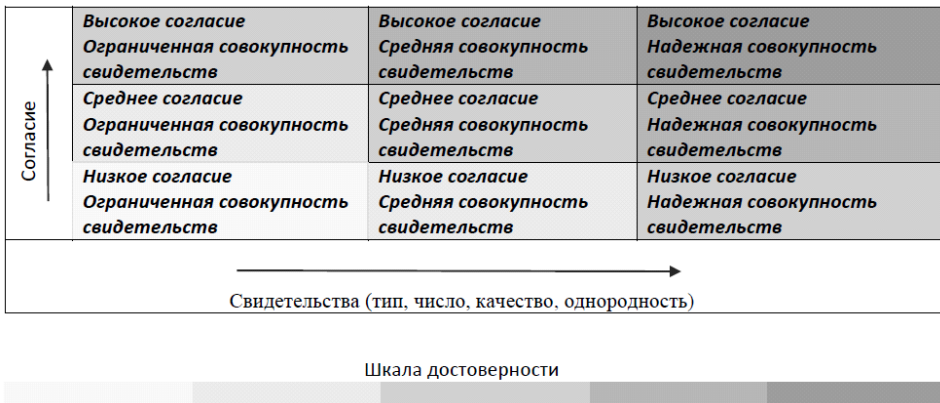


Рисунок 1. Зависимость достоверности от объема свидетельств и их согласия. Увеличение густоты серого цвета соответствует увеличению достоверности; внизу приведена результирующая шкала достоверности (Mastrandrea et al., 2010)

Для наиболее емкого описания неблагоприятных последствий изменения климата в докладах МГЭИК, в том числе в данном докладе, используется понятие «риск». В научной литературе, изначально в экономической, риск, связанный с каким-либо событием, понимался как произведение его вероятности на значение ущерба, возникающего в случае наступления этого события (Morgan, Henrion, 1990).

В данном докладе МГЭИК понятие «риск» используется в более широком понимании. Вот как он поясняется в «Глоссарии» (<https://www.ipcc.ch/srocc/download-report/>):

«Потенциал для неблагоприятных последствий для человека или экологических систем определяется с учетом разнообразия ценностей и целей, связанных с такими системами. В контексте изменения климата риски могут возникать как в связи с потенциальными воздействиями изменения климата, так и реакциями человека на изменение климата. Соответствующие неблагоприятные последствия включают те, что касаются жизни, средств к существованию, здоровья и благополучия, экономических, социальных и культурных ценностей и инвестиций, инфраструктуры, услуг (включая экосистемные услуги), экосистем и видов. В контексте воздействий изменения климата риски возникают в результате динамического взаимодействия климатообусловленных опасностей с подверженностью и уязвимостью человека или экологической системы к этим опасностям. Опасности, подверженности и уязвимости может быть свойственна неопределенность в отношении величины и вероятности возникновения, и каждая из этих характеристик может меняться во времени и пространстве вследствие социально-экономических изменений и принятия решений. В контексте мер реагирования на изменение климата риски связаны с возможностью таких ответных мер, которые не приведут к достижению поставленных целей, или же с возможными отрицательными взаимосвязями и отрицательными побочными эффектами для достижения других социальных целей, таких как Цели Устойчивого Развития (ЦУР). Риски могут возникнуть, например, от неопределенности в осуществлении, эффективности или результатах климатической политики, связанных с климатом инвестиций, разработки или внедрения технологий, а также системных переходов».

Такое расширение концепции полезно для теоретического анализа. Однако при выполнении прикладных оценок в конкретной ситуации чаще всего риски, возникающие в связи с изменениями климата, оцениваются исходя из изменений интенсивности/масштаба воздействий и вероятности их возникновения. При увеличении каждой из этих составляющих или обоих одновременно возникает дополнительный риск.

Для визуализации результатов оценки дополнительных рисков, возникающих при изменении климата, часто используется технология диаграмм «burning ember» (BE-diagram) – «тлеющих углей» (ТУ-диаграмма). Это диаграммы, где цветом (чаще всего, от белого до фиолетового) показываются дополнительные риски, возникающие при изменении какого-либо параметра климатической системы (средней глобальной температуры воздуха у земной

поверхности, уровня поверхности Мирового океана и т.д.). Иллюстративный пример такой диаграммы приведен на рис. 2. На левой оси приведены значения повышения средней глобальной температуры воздуха у земной поверхности по отношению к доиндустриальному уровню. Различные цвета обозначают уровень дополнительного риска для какой-либо природной или социально-экономической системы (или же их частей), возникающего в условиях соответствующего увеличения температуры. Справа вертикальными отрезками показан диапазон значений температуры, в котором обнаружен (при анализе и обобщении данных научных публикаций) переход к следующему, более высокому уровню дополнительного риска. Точками обозначена оценка достоверности этого перехода – Большая достоверность изображается большим числом точек. Типично при построении ТУ-диаграмм используется следующая легенда:

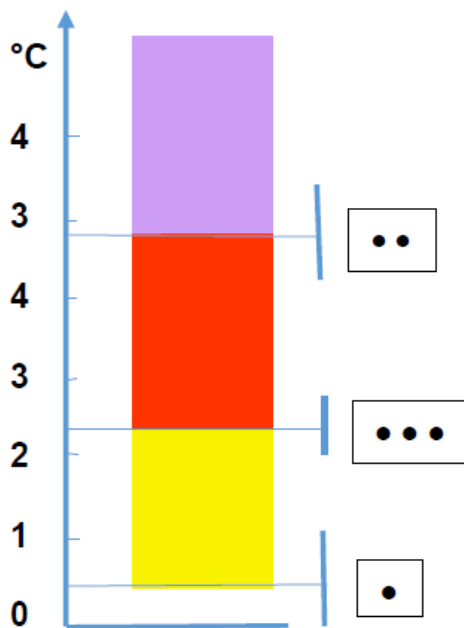


Рисунок 2. Иллюстративный пример диаграммы «тлеющих углей» (ТУ-диаграммы) фиолетовый – очень высокая вероятность значительных воздействий/рисков и наличие существенных необратимостей или устойчивых климатообусловленных опасностей в комбинации с ограниченной способностью к адаптации в связи с природой опасности или воздействий/рисков; красный – существенные и широко распространенные воздействия/риски; желтый – воздействия/риски выявляются и объясняются изменениями климата по крайней мере со средней достоверностью; белый – воздействия/риски не обнаружены.

На рис. 2 уровни достоверности переходов к более высоким уровням дополнительных рисков, которые обнаружены в соответствующих диапазонах (вертикальные черные отрезки), обозначаются различным числом черных заполненных кругов: 1 – низкий, 2 – средний, 3 – высокий, 4 – очень высокий.

В докладах МГЭИК обычно переходы цветов делаются непрерывными, постепенными. Однако это лишь специальный дизайн, более привлекатель-

ный с эстетической точки зрения. В иллюстративном примере, приведенном на рис. 2, этого не делалось.

Все основные выводы и заключения доклада, приведенные в «Резюме для политиков» и в исполнительных резюме глав основного текста доклада, снабжены оценками неопределенности в соответствии с рекомендациями, изложенными в (Mastrandrea et al., 2010). В данной статье они не приводятся для упрощения изложения материала.

Наблюдаемые изменения и воздействия

Изменения физических процессов

Установлено, что глобальное потепление, наблюдаемое в последние десятилетия, приводит к практически повсеместной деградации криосферы. А именно, сокращается площадь снежного покрова и арктических льдов, уменьшается масса ледников и ледниковых покровов. Так, в 2006-2015 гг. Гренландский и Антарктический ледовые покровы теряли массу со скоростью 278 и 155 Гт год⁻¹. Эти потери эквивалентны повышению уровня Мирового океана на 0.77 и 0.43 мм год⁻¹ соответственно. Остальные ледники суммарно теряли 220 Гт год⁻¹ (эквивалент потерь – 0.61 мм год⁻¹). Снежный покров в горах, в основном, сократился и по площади, и по продолжительности. Арктический снежный покров в июне на суше в последние 50 лет сократился; скорость сокращения – около 13% в десятилетие. Площадь морского льда в Арктике в 1979-2018 гг. сократилась для всех месяцев календарного года. Для сентября скорость сокращения составила примерно 13% в десятилетие, что беспрецедентно за последние 1000 лет. Температура многолетней мерзлоты в последние десятилетия повысилась.

Потепление Мирового океана ускоряется и для глубин 0-700 м, и для глубин 700-2000 м. Его темп более чем удвоился в 1993-2017 гг. по сравнению с 1969-1993 гг. Для больших глубин (глубже 2000 м) также обнаружено потепление, особенно – для Южного океана. Вследствие потепления и усиления притока пресных вод в высоких широтах стала более выраженной стратификация вод Мирового океана. В верхних 200 м в 1998-2017 гг. по сравнению с 1971-1990 гг. увеличение составило в среднем около 2%. Это ухудшает условия для вертикального перемешивания. В 1970-2010 гг. содержание кислорода в слое 0-1000 м сократилось на 0.5-3.3% в том числе вследствие усиления стратификации.

Увеличилась частота морских волн жары. При этом в 2006-2015 гг. в подавляющем числе случаев (84-90%) эти явления связаны с наблюдаемым глобальным потеплением.

Антропогенное увеличение содержания диоксида углерода в атмосфере приводит к его дополнительному поглощению океаном и, как следствие, к увеличению кислотности. С 1980-х годов 20-30% глобальной антропогенной эмиссии CO₂ было поглощено океаном. За этот период времени для открытого океана средняя скорость увеличения кислотности поверхностных вод, т.е. снижения pH, составила 0.017-0.027 в десятилетие.

Повышение среднего уровня Мирового океана – надежно установленное явление, в том числе с использованием спутниковых данных. Причина этого – тепловое расширение морской воды и усиление притока пресной воды вследствие интенсификации таяния ледников и ледниковых покровов из-за потепления климата. В последние десятилетия этот процесс ускорился. Средняя скорость повышения уровня в 1901-1990 гг. была 1.4 мм год^{-1} , а в 2006-2015 гг. уже 3.6 мм год^{-1} . Причем в последнем случае вклад ледников и ледовых покровов превосходил вклад теплового расширения, что связывается с ускорением потери массы Гренландским и Антарктическим ледниковыми покровами. В десятилетнем временном масштабе изменение уровня Мирового океана обладает региональной изменчивостью – примерно 30% от глобального изменения.

С кажущимся небольшим произошедшим глобальным потеплением – примерно на 1°C по отношению к доиндустриальным уровням – связана интенсификация некоторых экстремальных явлений. Это, например, осадки и ветер в тропических и внетропических циклонах, которые способны породить экстремальный подъем уровня океана.

Воздействия на экосистемы

Уменьшение оледенения и площади и продолжительности снежного покрова вследствие глобального потепления привело к изменению ареалов многих видов животных и растений. Для наземных видов типично движение границ их ареалов к большим высотам и в более высокие широты. Это вызвало соответствующие изменения в структуре, функции и динамике экосистем.

Как показывают спутниковые исследования, в тундре, горных лесах и лесах Заполярья в основном наблюдается «зеленение», обусловленное увеличением продуктивности растений, хотя иногда наблюдается и «коричневение», связанное с ее уменьшением. Потепление негативно сказалось на некоторых важных биологических видах, например, на олене и лососе. Непосредственно действующими факторами стали климатогенные изменения в гидрологии арктических и горных систем, беспрецедентные природные пожары в Арктике и резкое таяние многолетней мерзлоты.

С середины XX века наблюдались существенные изменения ареалов и фенологии многих морских биологических видов. Границы ареалов некоторых видов двигались в полярном направлении со скоростью 30-50 км в десятилетие. Изменения ареалов индуцировали структурные и функциональные изменения в морских экосистемах на севере Атлантического и Тихого океанов, а также в Арктике. В свободных ото льда областях увеличивается первичная продукция. Меняются границы распространения некоторых видов арктического зоопланктона и антарктического криля. Произошли изменения местообитания, в частности, некоторых видов морских млекопитающих и птиц вследствие сокращения площади морского льда и климатообусловленных изменений доступности корма. Изменения в полярных морских экосисте-

мах наблюдаются и негативные, и позитивные. При этом могут возникать каскадные эффекты, затрагивающие цепи питания промысловых рыб.

Закисление океанических вод и снижение уровня содержания кислорода негативно сказываются на продукции и биомассе в апвеллингах. Произошедшее в XX века увеличение температуры океана в совокупности с избыточным выловом привело к уменьшению потенциала улова для некоторых видов рыб. Уменьшение обилия рыб, моллюсков и ракообразных (shell-fish) из-за потепления и биогеохимических изменений регионально привело к снижению уловов, хотя есть регионы, где проявляются противоположные тенденции.

Потепление океана оказало заметное воздействие на состояние прибрежных экосистем. Заросли макрофитов и морских трав получили более широкое распространение в высоких широтах и сократились в низких широтах. С 1960-х годов наблюдалась значительная деградация мангровых лесов.

Подъем уровня океана приводит к усилению вторжения морских вод в эстуарии рек, что сокращает местообитание пресноводных видов. Эффект усиливается прямыми антропогенными воздействиями, которые наблюдаются в дельтах рек с большой плотностью населения в береговой зоне.

Закисление океана в совокупности с потеплением, особенно морские волны жары, усилившиеся с 1997 г., оказывают существенное негативное воздействие на состояние кораллов и экосистемы коралловых рифов вообще.

Воздействия на людей и экосистемные услуги

Наблюдаемая тенденция к сокращению криосферы в Арктике и высокогорье имеет, в основном, негативные последствия для здоровья, продовольственной безопасности, средств к существованию и благосостояния коренного местного населения, а также для инфраструктуры, рекреации и туризма. При этом выгоды, имеющиеся в ряде случаев, распределены неравномерно. Хозяйственные выгоды иногда сопряжены с дополнительными рисками для экосистем, как, например, в случае активизации транспортных перевозок в Арктике (включая туристические) вследствие сокращения ледового покрова в теплое время года.

Особенно заметны негативные эффекты в Арктике, где наблюдаемые изменения снежного покрова, речного и озерного льда и многолетней мерзлоты негативно влияют на уклад жизни местного населения, традиционные промыслы и самобытную культуру. Потепление обостряет проблемы для здоровья населения, в особенности в связи с трансмиссивными болезнями, а также с заболеваниями, связанными с пищей и водой. Опыт местного арктического населения способствует своевременной адаптации к изменениям криосферы, включая сроки хозяйственных мероприятий. В ряде случаев это касается и перемещений в пространстве инфраструктуры и населения для уменьшения рисков.

В горных районах Азии и тропических Андах изменения снежного покрова и отступление ледников неблагоприятно сказываются на сельском хозяйстве нижерасположенных территорий. Горный туризм, включая горно-

льжные возможности, испытывают негативное влияние сокращения криосферы в высокогорье. Страдают также некоторые эстетические и культурные ценности.

Изменения в обилии и пространственном распределении некоторых видов рыб, моллюсков и ракообразных (shell-fish) оказывают разнонаправленное воздействие на уловы. В некоторых регионах последствия отрицательные, в некоторых – положительные. Это сказывается, в том числе, на благосостоянии и укладе жизни местного населения.

Частота опасного цветения водорослей возросла с 1980-х годов, и изменение климата внесло в это свой вклад. Это явление оказывает негативное воздействие на продовольственную безопасность, туризм и здоровье населения.

Население прибрежных зон находится в условиях повышенного риска воздействия факторов, связанных с изменением климата. Среди них – наводнения и экстремальные подъемы уровня моря, морские волны жары, последствия деградации многолетнемерзлых пород для зданий и технических сооружений. Воздействие этих факторов усиливается одновременным действием факторов иной, неклиматической природы, таких как, например, удержание речных осадений дамбами.

Будущие изменения климата и риски

Как известно, состояние климата невозможно прогнозировать, исходя лишь из внутренних закономерностей самой климатической системы, поскольку на нее оказывают воздействие и факторы неклиматической природы, в том числе антропогенные. Наиболее мощными факторами такого рода являются эмиссия климатически активных веществ (парниковых газов и аэрозолей) в атмосферу в ходе хозяйственной деятельности, а также изменение свойств поверхности суши. Источник этих воздействий – социально-экономическая система, состояние которой пока не поддается прогнозированию. Поэтому, при расчете будущего состояния климата с помощью математических имитационных моделей земной системы используются так называемые сценарии – заданные изменения во времени антропогенных воздействий на климатическую систему. Они поступают на вход моделей при расчетах будущего климата. Такие сценарии разрабатываются международными группами специалистов и учитывают основные «сюжетные линии» (storyline) будущего социально-экономического развития человечества.

В данном докладе использованы два сценария: RCP2.6 и RCP8.5¹⁾. Описание сценариев можно найти в разделе 12.3 главы 12 Вклада Рабочей группы I в Пятый оценочный доклад МГЭИК (Collins et al., 2013). Первый из этих сценариев описывает развитие мирового хозяйства с минимизацией глобальных эмиссий парниковых газов, а второй – с экстенсивным использованием традиционных видов ископаемого органического топлива и, как следствие, с высо-

¹⁾ RCP – аббревиатура Representative Concentration Pathway, по-русски – репрезентативная траектория концентраций (РТК).

кими уровнями эмиссий. Числа, следующие за «RCP», означают то радиационное воздействие, которое возникает в 2100 г. в рамках соответствующего сценария. Для справки в табл. 1 приведены те значения глобального потепления по отношению к доиндустриальному уровню, которые соответствуют обоим сценариям.

Таблица 1. Увеличение средней глобальной температуры воздуха (°C) в приповерхностном слое относительно доиндустриального уровня (т.е. среднего за 1850-1900 гг.) в рамках сценариев RCP (IPCC, 2019)

В скобках приведены доверительные границы 5-95%

Сценарий	Период времени	
	2031-2050 гг.	2081-2100 гг.
RCP2.6	1.6 (1.1-2.0)	1.6 (0.9-2.4)
RCP4.5	1.7 (1.3-2.2)	2.5 (1.7-3.3)
RCP6.0	1.6 (1.2-2.0)	2.9 (2.0-3.8)
RCP8.5	2.0 (1.5-2.4)	4.3 (3.2-5.4)

Все основные тенденции изменений в состоянии криосферы и океана вследствие глобального потепления, которые наблюдались до настоящего времени, будут развиваться и далее в XXI веке, причем многие изменения усилятся и ускорятся во второй половине нашего века в условиях отсутствия ограничений на антропогенные воздействия на климатическую систему или при недостаточных ограничениях.

Изменения физических процессов

Потеря массы ледниками, деградация многолетней мерзлоты и уменьшение снегового и ледового покрытия в Арктике будет продолжаться в первой половине XXI века и в условиях высоких антропогенных эмиссий парниковых газов ускоряться в его второй половине.

Ледники (не считая ледниковых покровов) к концу века потеряют 18% и 36% массы в условиях сценариев RCP2.6 и RCP8.5 соответственно (эквивалент 94 и 200 мм подъема уровня океана). Регионы мира, в основном с небольшими ледниками, могут в условиях RCP8.5 потерять более 80% массы льда ледников. Продолжится сокращение осеннего и весеннего снежного покрова в Арктике, а также глубины снежного покрова на небольших высотах. Эти явления будут особенно выражены в условиях сценария RCP8.5. Многолетняя мерзлота будет деградировать в XXI веке и далее. До конца нашего века приповерхностный слой (3-4 м) существенно сократится. Однако неопределенность оценок сокращения значительна: 2-66% и 30-99% в условиях сценариев RCP2.6 и RCP8.5 соответственно. Это будет сопровождаться существенными дополнительными эмиссиями углекислого газа и метана в атмосферу. Эти явления деградации многолетней мерзлоты могут провоцировать опасные явления – лавины, оползни, наводнения, просадку грунта и т.д.

Речной сток будет меняться сложным образом. В горах, там, где он существенно зависит от снежного покрова и ледникового питания, независимо от

сценария он будет в среднем расти зимой. Весенние пики будут также увеличиваться. При этом годовой и летний сток будет в среднем достигать максимума в конце века, а в высокогорье в Азии – к середине века. В дальнейшем будет происходить уменьшение. В тропических Андах и в горах Центральной Европы, где имеются в основном небольшие ледники, этот пик уже пройден.

Площадь морского льда в Арктике в конце XXI века существенно зависит от сценария антропогенного воздействия на климатическую систему. При стабилизации глобальной температуры на уровнях 1.5 и 2°C над доиндустриальным значением вероятность свободного ото льда сентября – примерно 1 и 10-35% соответственно.

Весьма существенные изменения ожидаются в состоянии Мирового океана, причем некоторые ожидаемые условия будут не иметь аналогов в доиндустриальный период. Это касается, в том числе, его температурного режима, стратификации, течений, кислотности вод, содержания кислорода, первичной продукции и экстремальных явлений.

Слой океана 0-2000 м до конца нашего века накопит в несколько раз больше тепла, чем накопил к настоящему времени с 1970 г. Стратификация верхнего слоя 0-200 м на широтах 60°S - 60°N, усилится, что будет помехой вертикальным потокам питательных веществ, углерода и кислорода. Содержание кислорода, нитратов, первичная продукция и экспорт углерода снизятся к концу века по сравнению с уровнями начала века. При этом закисление поверхностных вод увеличится – pH снизится до 0.3 в условиях сценария RCP8.5. При реализации низкоэмиссионного сценария эффект будет значительно слабее, и негативные последствия в нашем веке наступят лишь для некоторых уязвимых экосистем.

Изменения основных факторов, определяющих состояние морских экосистем, а именно, потепление поверхностного слоя и закисление, уменьшение содержания кислорода и нитратов, изменение чистой первичной продукции затронут от 30 до 60% поверхности океана в зависимости от сценария антропогенного воздействия на климатическую систему.

В конце XXI века по сравнению с доиндустриальным периодом ожидается увеличение частоты морских волн жары по сравнению с доиндустриальным уровнем (1850-1900 гг.). Этот рост существенен – от 30 до 50 раз в зависимости от сценария. При этом будет возрастать их продолжительность, пространственный масштаб и интенсивность (максимальные значения температуры). Ожидается возрастание частоты таких крупных экстремальных явлений как Эль-Ниньо и Ла-Нинья.

Крупнейшее течение – атлантическая меридиональная опрокидывающаяся циркуляция (Atlantic meridional overturning circulation – АМОС), которая является частью глобальной циркуляции, распределяющей тепло в Мировом океане, также будет затронута климатообусловленными изменениями. Ожидается некоторое его замедление (что сопряжено с многообразными последствиями для различных физических и биологических систем на Земле).

Термическое расширение океанской воды и усиленное таяние криосферы, связанные с потеплением глобального климата, приводят к подъему уровня

океана, который будут происходить в нашем веке и в дальнейшем. При этом будет не только постепенно повышаться средний уровень ускоряющимися темпами, но и изменяться характер подобных местных явлений – повышенные уровни будут наблюдаться чаще, и они будут более значительными.

Средний уровень Мирового океана возрастет к 2081–2100 гг. по сравнению с современным (1986–2005 гг.) на 0.43 и 0.71 м соответственно в условиях сценариев RCP2.6 и RCP8.5. Оценка для высокоэмиссионного сценария несколько выше, чем данная в Пятом оценочном докладе МГЭИК, за счет обнаруженного большего вклада таяния Антарктического ледникового покрова. Модельные исследования показывают существенное увеличение темпов подъема уровня Мирового океана в ХХII веке.

При всех рассматриваемых сценариях на локальном уровне экстремальные уровни моря, наблюдавшиеся типично раз в столетие, будут к середине нашего века наблюдаться существенно чаще – по крайней мере, раз в год. Это будет иметь негативные последствия для низко расположенных прибрежных участков суши.

В условиях высокоэмиссионного сценария высота морских волн также будет возрастать во многих частях океана, в том числе в Южном океане и тропической восточной части Тихого океана, в Балтийском море. Однако в Средиземном море и на севере Атлантики будет происходить уменьшение высоты.

Тропические циклоны будут затронуты будущими изменениями климата. Их средняя интенсивность и связанные с ними осадки увеличиваются при глобальном потеплении на 2°C по отношению к величинам любого исходного периода. Их частота возрастает в ХХI веке при всех рассматриваемых в докладе сценариях RCP. Но достоверность дальнейшего увеличения низкая.

Ожидаемые риски для экосистем

В горных и полярных экосистемах продолжатся процессы миграции видов соответственно в направлении больших высот и в полярном направлении в ответ на потепление климата. Это приведет к ряду негативных экологических изменений, в том числе к сокращению ареалов и потерям биоразнообразия. Уникальные местные виды будут проигрывать в конкуренции с мигрантами. Деревья и кустарники будут произрастать на 24–52% сегодняшней тундры. Южная граница бореальных лесов сдвинется к северу.

Деграция многолетней мерзлоты и сокращение снежного покрова будут иметь серьезные последствия для гидрологического цикла в горных и арктических районах. Ожидается, что пожары в северных лесах и тундре, а также в горных экосистемах, усилятся – станут более частыми и интенсивными.

Биомасса и значения потенциального улова морских животных будут сокращаться при потеплении океана глобально соответственно на 15 и 21–24% в конце нашего века по отношению к уровням 1986–2005 гг. в условиях высокоэмиссионного сценария.

Вследствие усиления стратификации доступность питательных веществ в океанах в тропической зоне уменьшится, из-за чего чистая первичная продук-

ция заметно сократится. Напротив, потепление и изменение ледового покрытия в Арктике и вокруг Антарктики будут способствовать увеличению чистой первичной продукции. Однако глобально поглощение углерода океаном к концу века в условиях высокоэмиссионного сценария уменьшится.

Такие факторы, как потепление, закисление океанических вод и сокращение сезонного ледового покрытия негативно скажутся на многих арктических морских видах. Их ареалы будут сокращаться, а субарктические виды, напротив, будут продвигаться в полярном направлении. В Южном океане ареал антарктического криля, который служит пищей для многих видов антарктических животных, будет сокращаться в условиях всех рассматриваемых сценариев.

Большое внимание уделено в докладе влиянию будущих изменений климата на прибрежные экосистемы – их структуру, функционирование и биоразнообразие. В особенно неблагоприятных условиях окажутся экосистемы скалистых берегов, находящиеся в приливно-отливной зоне, а также заросли морских трав и соленые марши. Значительная доля прибрежных увлажненных систем (wetlands) окажутся в условиях риска исчезновения к концу нашего столетия. Потепление океана, подъем его уровня и изменения приливно-отливного режима могут вызывать засоление и обескислороживание некоторых речных дельт, что будет иметь серьезные последствия для местной биоты. В условиях особенно высоких климатообусловленных рисков оказываются коралловые рифы теплых вод.

Оценки дополнительных рисков, которые возникают для различных экосистем при изменениях климата в условиях глобального потепления, суммированы в зависимости от уровня потепления в виде ТУ-диаграммы. Эти оценки выполнены для следующих объектов: кораллы теплых вод, заросли макрофитов, заросли морских трав, эпипелагиаль, скалистые берега, соленые марши, кораллы холодных вод, дельты, песчаные берега, мангровые леса, абиссальные равнины.

Ожидаемые риски для людей и экосистемных услуг

Дополнительные риски для людей, их средств к существованию и инфраструктуры, связанные с климатообусловленными изменениями состояния криосферы, ожидаются и в горных районах, и в Арктике. Это результат дополнительных угроз, ассоциированных с экстремальными явлениями – наводнениями, пожарами (в материковой зоне), оползнями, лавинами. Риски возможно снизить своевременными мерами адаптации.

Серьезной проблемой является проседание грунта вследствие климатообусловленного дополнительного протаивания многолетней мерзлоты. Это составляет угрозу для городской и сельской инфраструктуры, особенно в Арктике, что во многих случаях требует ее переустройства.

Для многих стран деградация криосферы в горах представляет существенную проблему для горного туризма – важной части национальной экономики. Это касается, в том числе, стран Европы и Северной Америки, а также Японии.

Для многих сообществ людей морские биологические ресурсы являются важнейшей частью их средств к существованию. В условиях обоих сценариев

– RCP2.6 и RCP8.5 в нашем веке ожидаются существенные изменения пространственного распределения биомассы морских животных и значений потенциального улова рыбы. При потеплении океана увеличивается накопление некоторых опасных для здоровья людей веществ в организмах морских животных, а также вероятность наличия в них патогенов, что повышает риск для здоровья людей, использующих морепродукты.

Возможный ущерб туризму связан с высокой чувствительностью тепловодных кораллов к потеплению климата и закислению поверхностного слоя океана. Это проявляется при всех рассматриваемых сценариях.

Все это составляет угрозу благосостоянию сообществ людей, экономически чувствительных к доступности морских биологических ресурсов. Конечно, эти риски будут более выражены в условиях высокоэмиссионного сценария.

Постепенное увеличение среднего уровня океана, а также его экстремальных значений в течение нашего века без расширения мер адаптации усилят эрозию берегов и засоление прибрежных экосистем, увеличат риски, связанные с наводнениями. При этом прибрежные сообщества людей будут часто находиться в условиях достижения пределов возможности адаптации.

Заключение

«Специальный доклад МГЭИК об океане и криосфере в условиях меняющегося климата» существенно дополнил информацию, содержащуюся в Пятом оценочном докладе МГЭИК, вышедшем в 2013-2014 гг. В этом специальном докладе систематически представлены физические изменения в состоянии океана и криосферы, обусловленные наблюдаемыми и ожидаемыми в нашем веке изменениями глобального климата, и указаны их основные последствия для природных и социально-экономических систем. Эти оценки основаны на результатах современных научных исследований, представленных в научной литературе. Основные выводы и заключения доклада снабжены оценками из правдоподобия/достоверности. В докладе широко использована визуализация числовых данных, что способствует доведению основных результатов до лиц, принимающих решение, и профильных общественных организаций.

Весьма важно, что в специальном докладе рассматриваются также возможности адаптации природных и социально-экономических систем. Хотя в данной статье мы не останавливались на этих вопросах, имеющих прямое отношение к выработке климатической политики на национальном и международном уровнях, а представили лишь естественнонаучную составляющую доклада, необходимо подчеркнуть, что доклад имеет несомненную ценность и для научного сопровождения международного переговорного процесса в области климата, который идет под эгидой РКИК ООН.

Список литературы

Гладильщикова А.А., Семенов С.М. 2017. Межправительственная группа экспертов по изменению климата (МГЭИК): цикл Шестого оценочного доклада. – *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 2, с. 13-25. DOI: 10.21513/2410-8758-2017-2-13-25.

Парижское соглашение. Организация Объединенных Наций. 2015, 32 с. URL: https://unfccc.int/sites/default/files/russian_paris_agreement.pdf.

РКИК ООН, 1992. Рамочная Конвенция Организации Объединенных Наций об изменении климата организация объединенных наций. *FCCC/INFORMAL/84 GE.05-62222 190705 280705*, 30 с. – Электронный ресурс. URL: http://www.un.org/ru/documents/decl_conv/conventions/climate_framework_conv.shtml.

Семенов С.М., Инсаров Г.Э., Мендес К.Л. 2019. Характеристика неопределенностей в оценках межправительственной группы экспертов по изменению климата. – *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 1, с. 76-96. DOI: 10.21513/2410-8758-2019-1-76-96.

Collins M., Knutti R., Arblaster J., Dufresne J.-L., Fichet T., Friedlingstein P., Gao X., Gutowski W.J., Johns T., Krinner G., Shongwe M., Tebaldi C., Weaver A.J., Wehner M. 2013. Long-term Climate Change: Projections, Commitments and Irreversibility. – In: *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., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.). – Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

IPCC 2014. *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.*/Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.). – Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1132 p.

IPCC 2019. *Summary for Policymakers. IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate* /H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N. Weyer (eds.). – Available at: <https://www.ipcc.ch/srocc/download-report/>.

Mastrandrea M.D., Field C.B., Stocker T.F., Edenhofer O., Ebi K.L., Frame D.J., Held H., Kriegler E., Mach K.J., Matschoss P.R., Plattner G.-K., Yohe G.W., Zwiers F.W. 2010. *Guidance Note for Lead Authors of the IPCC Fifth Assessment*

Report on Consistent Treatment of Uncertainties. IPCC Cross-Working Group Meeting on Consistent Treatment of Uncertainties. – Jasper Ridge, CA, USA 6-7 July 2010. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Available at: <<http://www.ipcc.ch>>.

Morgan M.G., Henrion M. 1990. Uncertainty: A Guide to Dealing with Uncertainty in Quantitative Risk and Policy Analysis. – Cambridge University Press, Cambridge.

Статья поступила в редакцию: 06.10.2019 г.

После переработки: 06.10.2019 г.

MODERN CLIMATE-RELATED GLOBAL CHANGES IN THE OCEAN AND CRYOSPHERE: THE 2019 SPECIAL REPORT OF THE INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC)

S.M. Semenov^{1), 2), 3)}, E.D. Igoikina¹⁾*

¹⁾ Yu. A. Izrael Institute of Global Climate and Ecology,
20B, Glebovskaya str., 107258, Moscow, Russian Federation; **SergeySemenov1@yandex.ru*

²⁾ Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences,
29, Staromonetny lane, 109017, Moscow, Russian Federation

³⁾ National Research University Higher School of Economics,
20, Miasnitskaya str., 101000, Moscow, Russian Federation

Abstract. In the last decade, new scientific research has shown that the observed changes in the state of the oceans and the cryosphere are associated with global warming or it exacerbates the impact of other factors of a non-climatic nature. These results are analyzed and summarized in the “IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate” (2019). In preparing the report, the IPCC authors used new methodologies for the characterization and visualization of risks and uncertainties in the development of which significant progress was achieved in recent years. The article briefly presents these methodologies, the structure of the report and its main scientific findings and conclusions.

Keyword. Global climate, change, impacts, ocean, cryosphere, special report.

References

Gladil'shchikova A.A., Semenov S.M. 2017. Mezhpriatel'stvennaya gruppa ekspertov po izmeneniyu klimata (MGEIK): cikl Shestogo ocenoch'nogo doklada [Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC): Six Assessment Report Cycle]. *Fundamental'naya i Prikladnaya Klimatologiya – Fundamental and Applied Climatology*, vol. 2, pp. 13-25. DOI: 10.21513/2410-8758-2017-2-13-25.

Parizhskoe soglasenie. Organizaciya Ob"edinennyh Nacij [Paris Agreement. United Nations]. 2015, 32 p. URL: https://unfccc.int/sites/default/files/russian_paris_agreement.pdf.

RKIK OON 1992. *Ramochnaya Konvenciya Organizacii Ob"edinennyh Nacij ob izmenenii klimata. Organizaciya Ob"edinennyh Nacij* [United Nations Framework Convention on Climate Change. United Nations]. FCCC/INFORMAL/84 GE.05-62222 190705 280705, 30 p. URL: http://www.un.org/ru/documents/decl_conv/conventions/climate_framework_conv.shtml.

Semenov S.M., Insarov G.E., Mendes K.L. 2019. Harakteristika neopredelennostej v ocenkah Mezhpriatel'stvennoj Gruppy Ekspertov po

Izmeneniyu Klimata. *Fundamental'naya i Prikladnaya Klimatologiya – Fundamental and Applied Climatology*, vol. 1, 2019, pp. 76-96. DOI: 10.21513/2410-8758-2019-1-76-96

Collins M., Knutti R., Arblaster J., Dufresne J.-L., Fichefet T., Friedlingstein P., Gao X., Gutowski W.J., Johns T., Krinner G., Shongwe M., Tebaldi C., Weaver A.J., Wehner M. 2013. Long-term Climate Change: Projections, Commitments and Irreversibility. – In: *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., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.). – Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

IPCC 2014. *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* /Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.). – Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1132 p.

IPCC 2019. *Summary for Policymakers. IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate.*/H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N. Weyer (eds.). – Available at: <https://www.ipcc.ch/srocc/download-report/>.

Mastrandrea M.D., Field C.B., Stocker T.F., Edenhofer O., Ebi K.L., Frame D.J., Held H., Kriegler E., Mach K.J., Matschoss P.R., Plattner G.-K., Yohe G.W., Zwiars F.W. 2010. *Guidance Note for Lead Authors of the IPCC Fifth Assessment Report on Consistent Treatment of Uncertainties. IPCC Cross-Working Group Meeting on Consistent Treatment of Uncertainties.* – Jasper Ridge, CA, USA 6-7 July 2010. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Available at: <http://www.ipcc.ch>.

Morgan M.G., Henrion M. 1990. *Uncertainty: A Guide to Dealing with Uncertainty in Quantitative Risk and Policy Analysis.* – Cambridge University Press, Cambridge.