

## МЕТЕОРОЛОГИЯ, КЛИМАТОЛОГИЯ

УДК 504.5: 332 (985)

DOI: 10.30758/0555-2648-2018-64-1-55-70

### ОБ ОЦЕНКЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ РИСКОВ И УЯЗВИМОСТИ ПРИРОДНЫХ И ХОЗЯЙСТВЕННЫХ СИСТЕМ В МОРСКОЙ АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЕ РФ

С.А. СОЛДАТЕНКО, Г.В. АЛЕКСЕЕВ\*, Н.Е. ИВАНОВ,  
А.Е. ВЯЗИЛОВА, Н.Е. ХАРЛАНЕНКОВА

ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия

\*alexgv@aari.ru

### ON ASSESSMENT OF CLIMATIC RISKS AND VULNERABILITY OF NATURAL AND ECONOMIC SYSTEMS IN THE SEA ZONE OF THE RUSSIAN ARCTIC

S.A. SOLDATENKO, G.V. ALEKSEEV\*, N.E. IVANOV,  
A.E. VYAZILOVA, N.E. KHARLANENKOVA

State Scientific Center of the Russian Federation Arctic and Antarctic Research Institute,  
St. Petersburg, Russia

\*alexgv@aari.ru

Received April, 07, 2018

Accepted April, 20, 2018

*Keywords:* Arctic, climatic risks, economic systems, vulnerability.

#### Summary

The article presents an analysis of the impacts of climate change on the natural and economic systems of the Arctic and the existing methods for assessing climatic risks. Based on the analysis of the impact of climate change on natural and economic systems and the Arctic population, a register of risks due to climate change has been formed. A conceptual model for assessing the impact of climate change on various systems is proposed. The main problems in the identification of climatic risks in the Arctic are identified. Indicators of climate change were selected: the surface air temperature; sea ice extent and the frequency of dangerous hydrometeorological phenomena that affect economic activity in the Arctic sea zone and its individual regions. The assessment methodology of natural and economic systems vulnerabilities in the Russian Arctic sea zone, including susceptibility to impacts, sensitivity and adaptive potential, is considered. These are the key factors on the basis of which the

**Citation:** S.A. Soldatenko, G.V. Alekseev, N.E. Ivanov, A.E. Vyazilova, N.E. Kharlanenkova. On Assessment of Climatic Risks and Vulnerability of Natural and Economic Systems in the Sea Zone of the Russian Arctic. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2018, 64 (1): 55–70. [In Russian]. doi: 10.30758/0555-2648-2018-64-1-55-70

systems vulnerability to climate change is determined, as well as the information support of the processes of assessment and reduction of the consequences of climate threats. The algorithm of the developed methodology for vulnerability determining includes a sequence of 7 steps.

Поступила 07 апреля 2018 г.

Принята к печати 20 апреля 2018 г.

*Ключевые слова:* Арктика, климатические риски, уязвимость, хозяйственные системы.

В статье представлены описания воздействий изменения климата на природные и хозяйственные системы Арктики и существующих методов оценки климатических рисков. Сформирован реестр рисков, рассмотрены методы оценки климатических рисков в арктической зоне РФ, индикаторы изменения климата в Арктике, предложен подход к оценке уязвимости природных систем и экономики в морской Арктической зоне РФ к изменению климата, обобщены рекомендации по принятию адаптационных мер.

## ВВЕДЕНИЕ

В последнее десятилетие все больше внимания уделяется последствиям изменений климата и рискам, связанным с климатическими изменениями в Арктике. Арктическая зона РФ (АЗРФ), территория которой составляет более четверти общей площади территории страны, имеет важнейшее геополитическое и экономическое значение [1–3]. Однако арктические системы — природные, экономические, социальные — в силу экстремальности климатических условий оказываются чрезвычайно уязвимыми к изменениям климата [4–6].

Прибрежные зоны арктических морей (природные экосистемы, население, инфраструктура, объекты природопользования и другие естественные и антропогенные системы), морская деятельность (грузоперевозки, поиск, разведка и освоение месторождений нефти и газа на шельфе Арктики, лов рыбы и иных морепродуктов), в том числе оборонная, морские экосистемы, вследствие особенностей изменения климата Арктики, оказались сегодня в зоне климатических рисков [7, 8].

Изучением климатических рисков занимаются различные международные группы экспертов под патронатом ряда подразделений ООН (IPCC, UNEP, UNDP и др.), экспертные группы, финансируемые правительствами, крупными транснациональными корпорациями, неправительственными фондами и организациями. В целом исследование климатических рисков в АЗРФ находится на начальной стадии и ограничивается в основном общими умозаключениями.

Ввиду огромной площади АЗРФ и вариативности погодных, гидрологических и климатических условий картина климатических рисков в Арктике должна быть очень пестрой. Современное состояние вопроса позволяет заключить — сегодня в России не существует структурированной и многогранной стратегии оценки и менеджмента климатических рисков для АЗРФ, отсутствуют интегрированные математические модели оценки рисков, такие, например, как [9], не выработаны агрегированные показатели уязвимости для каждого класса систем, функционирующих в арктическом мегарегионе, не получены достоверные количественные оценки влияния климатических изменений на природные и антропогенные системы и основные виды экономической деятельности, а следовательно, надежные оценки климатических рисков для территории Российской Арктики отсутствуют.

Наблюдаемые изменения глобального климата проявляются с наибольшей интенсивностью в арктическом регионе. Наиболее ярким региональным откликом на

развивающиеся процессы глобального потепления является сокращение протяженности и толщины арктических морских льдов. Распространение льдов в арктических морях оказывает прямое влияние на морскую хозяйственную деятельность. Льды стали дальше отступать от берегов, хотя отступление не было одинаковым вдоль всего побережья сибирских арктических морей.

Более частое появление айсбергов вследствие разрушения островных ледников увеличивает риск для морских перевозок и проектируемой добычи углеводородов на арктическом шельфе. Произошедшие изменения климата оказали негативное влияние на берега арктических морей, которые стали разрушаться вследствие повышения температуры воздуха, сопровождающегося таянием мерзлых пород, и усиления ветрового волнения, оказывая негативное влияние на прибрежную инфраструктуру. Экосистемы северных морей в условиях меняющегося климата также претерпевают заметные изменения. Так, в связи с сокращением площади морских льдов значительно ухудшились условия обитания белого медведя. Изменения климата окажут существенное влияние и на условия рыбного промысла в арктических морях.

### **МЕТОДЫ ОЦЕНКИ КЛИМАТИЧЕСКИХ РИСКОВ МОРСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ В АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЕ РФ**

На основе анализа существующих подходов и методов оценки воздействия изменения климата на человека, социальные, экономические и природные системы, а также принимая во внимание то, что эти методы являются неотъемлемой составной частью процедур оценки климатических рисков и выработки адаптационных мер, можно заключить, что информационные компьютеризированные системы, построенные на идеологии так называемых интегрированных оценочных моделей (систем), представляют собой наиболее целесообразное и перспективное направление развития методического аппарата анализа и оценки влияния климатических изменений на живые и неживые объекты и системы.

Интегрированная оценка предполагает междисциплинарный подход к проблеме, имеющий в своей основе использование знаний различных дисциплин, а также широкого спектра подходов и методов исследований из разных научных областей, естественно, во взаимной увязке между собой. В итоге интегрированная оценка имеет то преимущество, что ее результаты могут использоваться в комплексном управлении социально-экономической, политической и иной деятельностью в арктическом регионе Российской Федерации. Однако разработка подобной системы оценки требует математического и, что очень важно, информационного обеспечения.

Объем информации о земной климатической системе и природных экосистемах достаточно большой и вполне достаточен для выполнения оценки. Хотя значительные неопределенности, характерные для сценариев роста концентрации парниковых газов и изменения глобального и регионального (арктического) климата, ухудшают качество оценки. Более серьезная проблема — отсутствие (или очень малый объем) реалистичной ретроспективной и прогностической экономической и социальной информации. Отсутствие качественной социально-экономической информации становится серьезным барьером на пути получения достоверных оценок влияния изменения климата на конкретные регионы, промышленные кластеры, города и отдельные отрасли и предприятия, поскольку непонятно, как выполнять валидацию соответствующих математических моделей. В сложившихся обстоятельствах



Рис. 1. Концептуальная модель оценки воздействия изменения климата на различные системы  
 Fig. 1. A conceptual model of assessing the impact of climate change on different systems

качественные методы оценки, по-видимому, будут иметь предпочтение перед количественными методами.

Оценка влияния изменения климата на системы (природные, социальные, экономические) предполагает наличие информации о стресс-факторах (сценарии изменения климата, как в масштабах планеты, так и в Российской Арктике), формулировку целей оценки, определение субъектов, представляющих интерес (сектора экономики, регионы и др.), обоснование требований к входным данным, математическим моделям и методам. Результат оценки — показатели как качественные («значительное влияние», «слабое влияние» и т.д.), так и количественные (коэффициенты чувствительности). На рис. 1 представлена концептуальная модель оценки воздействия изменения климата на различные системы, в рамках которой планируется выполнять оценку. Данная модель является результатом синтеза исследований, связанных с климатическим риск-менеджментом (см., например, [10–13]).

Климатический риск, как принято считать, обусловлен изменениями глобального климата, воздействующими на природные и антропогенные системы. Универсальный подход к оценке рисков и риск-менеджменту был предложен Международной организацией по стандартам (ISO) в 2009 г. (семейство стандартов ISO 31000). В нашей стране данные стандарты известны как стандарт ГОСТ Р ИСО/МЭК 31010-2011 «Менеджмент риска. Методы оценки риска» [14]. Этот

документ является методологической основой для выполнения оценки во многих областях человеческой деятельности, в том числе и для оценки климатического риска и климатического риск-менеджмента. Семейство стандартов ISO 31000 предлагает общие принципы по оценке рисков и управлению ими в организациях и бизнес-структурах на основе общепризнанной на сегодняшний день парадигмы риск-менеджмента.

Согласно ISO 31000, оценка риска (risk assessment) объединяет три основных процесса: идентификацию риска, его анализ и «материализованную» оценку риска (risk evaluation). Данный взгляд на оценку климатического риска в настоящее время является общепризнанным и используется различными агентствами и организациями в их практической деятельности.

Целью идентификации риска является определение источников риска и тех неблагоприятных событий, которые могут повлиять на эффективность функционирования рассматриваемой системы. Существуют три основных метода риск-анализа: анализ чувствительности системы к риск-факторам, анализ сценариев (является дальнейшим шагом после анализа чувствительности) и метод стохастического математического моделирования.

Для анализа чувствительности и сценариев могут использоваться как качественные методы анализа (при отсутствии необходимого количества данных и при отсутствии математических моделей рассматриваемых систем), так и количественные методы. Поскольку каждая система реагирует на климатические изменения по-разному, оценка климатического риска должна выполняться для каждой конкретной системы (процесса) индивидуально с учетом уровня приемлемого риска. Определяемый в результате анализа уровень риска соотносится с допустимыми критериями.

Арктика — очень специфический регион с точки зрения происходящих в нем климатических изменений под влиянием глобального изменения климата. Данное обстоятельство предъявляет высокие требования к составлению перечня риск-факторов для основных систем, находящихся в арктическом регионе, и социально-экономических процессов, происходящих в нем. Ниже представлен реестр климатических рисков для морского транспорта, портовой инфраструктуры, морского рыболовства.

Риски, связанные с морскими льдами [15]:

1. *Риск раннего появления льда и региональных вторжений льдов.* Раннее замерзание морей Западной Арктики оказывает существенное воздействие на проведение морских операций в раннеосенний сезон при появлении льда или припая в ранние сроки повторяемостью не чаще одного раза в 10 лет. Образование молодого ледяного покрова после периода очищения моря решающим образом сказывается на сроках завершения безледокольного плавания и начала ледокольной проводки.

2. *Риск вторжения труднопроходимых льдов на трассы плавания.* При определенных синоптических условиях, в результате дрейфа и перемещения сплоченного льда, на трассах плавания могут очень быстро формироваться тяжелые ледовые условия. Плавание судов в этих случаях становится исключительно сложным и опасным и может приводить к срыву морских операций, к авариям и катастрофам.

3. *Риск возникновения опасных ледовых явлений.* К ним относится сжатие льдов, когда дрейфующие льдины оказывают давление друг на друга. Сжатие льдов считается одним из наиболее опасных ледовых явлений, поскольку чаще всего служит причиной вынужденного дрейфа и даже гибели судов. Облипание корпуса судна снежно-ледяной массой, когда внезапно образуется многотонная снежно-ледяная подушка на бортах корпуса ледокола, в осенне-зимний период во время форсирования сплошного или 9–10-балльного очень заснеженного ледяного покрова — частое явление при сжатиях. Облипание в значительной степени влияет на движение судна во льдах.

4. *Риск обледенения судов.* Обледенение судов развивается под действием брызг и атмосферных осадков, когда температура воздуха устойчиво держится ниже температуры замерзания воды, а поверхность моря еще свободна ото льда, и заключается в отложении льда на поверхности судна. Обледенение затрудняет работу экипажа на палубе, использование палубного и радионавигационного оборудования, а для небольших судов создает опасность потери устойчивости.

5. *Риск столкновения с айсбергом.* Айсберги широко распространены в ряде районов арктических морей евразийского шельфа. Айсберги и их обломки из-за своей значительной массы и большой осадки представляют серьезную опасность для транспортных судов и ледоколов, инженерных сооружений и коммуникаций, а также газонефтяных комплексов, эксплуатация которых осуществляется или планируется на арктическом шельфе.

Климатические риски, связанные с опасными гидрометеорологическими явлениями [16]:

1. *Риск от штормового ветра.* Многие виды морской деятельности в арктических морях ограничивает выход скорости ветра за уровень 15 м/с.

2. *Риск от штормового волнения.* В результате сильного волнения создается опасность для судов, наносится ущерб портам, терминалам и другим транспортным структурам в береговой и прибрежной зоне. Значительный экономический ущерб сильное волнение вызывает и при морской добыче нефти и газа.

3. *Риск от повышения и штормовых колебаний уровня моря.* Для арктических морей негативные последствия повышения уровня могут оказаться более значительными, чем для других акваторий, что связано с низким положением обширных участков берегов, состоящих из мерзлых пород и ископаемого льда. Штормовые нагоны под действием ветра могут вызвать повышение уровня на несколько метров, что представляет опасность для береговой инфраструктуры.

### ИНДИКАТОРЫ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА В АРКТИКЕ

Приповерхностная температура воздуха, площадь морского льда и повторяемость опасных гидрометеорологических явлений в морской Арктике и отдельных ее районах являются наиболее важными индикаторами изменений климата, влияющих на хозяйственную деятельность.

#### *Температура воздуха в области морской Арктики*

В области морской Арктики (рис. 2а) самым теплым за период наблюдений с 1951 г. оказался 2016 год. Средняя приповерхностная температура воздуха (ПТВ) зимой в этот год по данным 41 станции (рис. 2б) составила  $-19,3$  °С. Летом средняя температура 2016 г. ( $5,8$  °С) стала второй в ряду теплых летних сезонов после 2012 г. ( $5,9$  °С). В 2017 г. обе температуры понизились, особенно летом (рис. 2в).

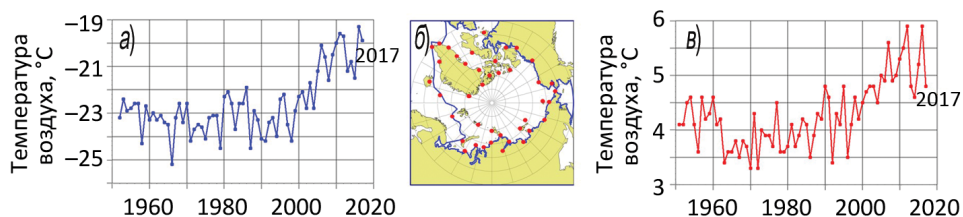


Рис. 2. Средняя за декабрь–февраль (а) и за июнь–август (в) приповерхностная температура воздуха на 41 станции в морской Арктике (б) в 1951–2017 гг. (точки на карте — положение станций)  
 Fig. 2. Average surface air temperature in December–February (a) and June–August (c) at 41 stations in marine Arctic (b) in 1951–2017 (the points on the map are the position of the stations)

### Морской лёд

По данным ГНЦ РФ ААНИИ (<http://www.aari.ru/datasets>), минимальная средне-месячная площадь морского льда в 2017 году, наблюдаемая в сентябре, составила 4,74 млн км<sup>2</sup> (рис. 3), что является седьмым значением в ряду минимальных значений за период с 1979 г. Абсолютный минимум достигнут в сентябре 2012 г., в 2016 г. сентябрьский минимум оказался четвертым, в 2017 г. произошел дальнейший рост.

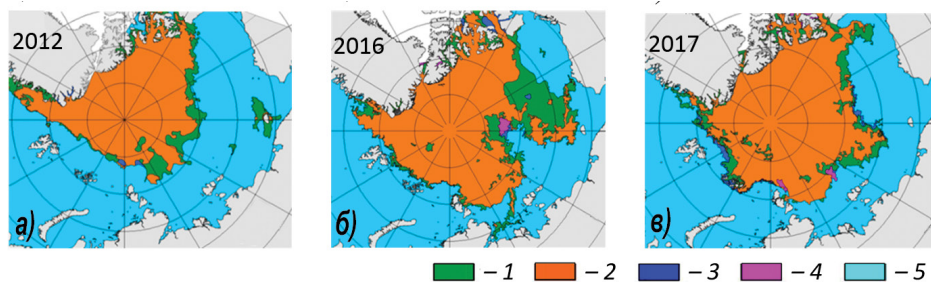


Рис. 3. Распространение и сплоченность морского льда в Арктике в сентябре 2012, 2016 и 2017 гг., средние за месяц: 1 — 1–6 баллов, 2 — 7–10 баллов, 3 — nilas (0–10 см), 4 — молодой лёд (0–30 см), 5 — чисто

Fig. 3. Average sea ice concentration in Arctic in September 2012, 2016 and 2017: 1 — 1–6 tenths, 2 — 7–10 tenths, 3 — nilas (0–10 cm), 4 — young ice (0–30 cm), 5 — ice free

Сокращение площади льда в сентябре и повышение летней температуры воздуха находятся в тесном согласии (коэффициент корреляции  $-0,92$ ), испытывая при этом значительные межгодовые колебания. Одновременно с сокращением площади льда происходит уменьшение его толщины вследствие исчезновения значительной части многолетних льдов.

### Повторяемость опасных гидрометеорологических явлений

Квантили многолетнего распределения, тенденции и тренды межгодовой изменчивости повторяемости низкой температуры определены по рядам ежегодных сумм  $N_{-30}$  числа дней (хотя бы 1 раз в сутки) с температурой  $-30$  °C и ниже за холодный сезон с ноября по март. Значения  $N_{-30}$  за каждый год обобщены по сети ГМС для каждого из арктических морей. Тренды повторяемости числа дней с опасными явлениями для всех характеристик также определены по сети ГМС для каждого из арктических морей. На рис. 4 приведены диаграммы временных рядов и линии

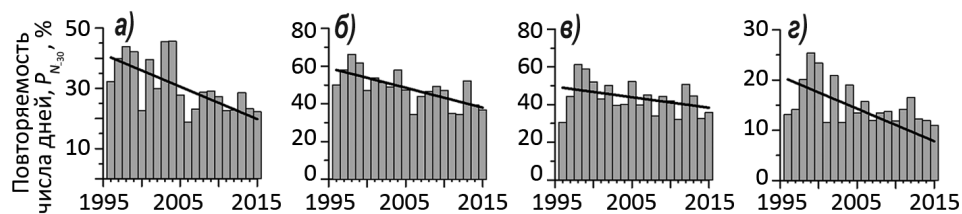


Рис. 4. Диаграммы и тренды повторяемости числа дней с опасными явлениями в российских арктических морях. Температура воздуха  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  и ниже, ноябрь–март: а) — Карское море, б) — море Лаптевых, в) — Восточно-Сибирское море, з) — Чукотское море

Fig. 4. Diagrams and trends of extreme weather frequency in Russian Arctic seas. Air temperature  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  and below, November–March: а) — Kara Sea, б) — Laptev Sea, в) — East Siberian Sea, з) — Chukchi Sea

трендов. Коэффициент тренда определен изменением повторяемости числа дней с событием за 10 лет ( $\%/10$  лет).

В сибирских арктических морях в ноябре–марте с 1995 по 2015 г. тренд повторяемости дней с низкой температурой воздуха отрицательный (незначим в Восточно-Сибирском море и значим в остальных морях). Наблюдается тенденция пространственного изменения в направлении с запада на восток: тренд ослабевает в Восточно-Сибирском море сравнительно с морями Карским и Лаптевых, а в Чукотском море опять увеличивается. Соответствующие дисперсии тренда составили 40–45, 15 и 40 %.

Повторяемость штормов (ветер более 30 м/с) и сильных ветров (более 15 м/с) получены интегрально по всем румбам (без учета направления). На многих ГМС нет полных данных о максимальных порывах между сроками. Поэтому использованы данные только в срок измерения (4 раза в сутки). Тенденции и тренды межгодовой изменчивости определены для ветра 15 м/с и более по ежегодным суммам числа дней за сезон (ноябрь–март), в которые ветер достигал и превышал 15 м/с хотя бы один раз в сутки. Приведены характеристики многолетней изменчивости непрерывной продолжительности сильного ветра 15 м/с и более.

Тенденции и тренды многолетней изменчивости повторяемости сильного ветра определены по рядам ежегодных значений числа дней  $N_{15}$  с ноября по март. Тренды повторяемости дней с ветром более 15 м/с с ноября по март за 1995–2015 гг. в морях Баренцевом, Лаптевых, Восточно-Сибирском исчезающе малые — относительная дисперсия тренда менее 5 %. Только в Карском море и в Чукотском море (положительный тренд) относительная дисперсия составила 10–35 %. Подчеркнем оппозицию между западным сектором Арктики (отрицательный тренд) и Чукотским морем (положительный тренд).

#### МЕТОДИКА ОЦЕНКИ УЯЗВИМОСТИ ПРИРОДНЫХ СИСТЕМ И ЭКОНОМИКИ К ИЗМЕНЕНИЮ КЛИМАТА В МОРСКОЙ АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЕ РФ

Разрабатываемая в рамках интегрированно-оценочного подхода методика оценки уязвимости природных систем и экономики в морской Арктической зоне РФ к изменению климата является продуктом анализа и последующего синтеза результатов многочисленных отечественных и зарубежных исследований, связанных с рассмотрением различных сторон климатического риск-менеджмента. Особое



внимание обращено на анализ исследований и разработок, выполненных в арктических странах: Канаде, Дании, Финляндии, Исландии, Норвегии, Швеции и США.

Уязвимость природных и антропогенных систем к изменению климата лежит в основе большой группы методов оценки климатических рисков. При выполнении широкого спектра междисциплинарных исследований уязвимость на протяжении многих лет служит мерой оценки ущерба, который изменение климата наносит социально-экономическим и природным системам.

Термин «уязвимость» имеет множество определений и интерпретаций. Согласно документам Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК), уязвимость определяется как «степень восприимчивости системы к неблагоприятным последствиям изменения климата, включая его изменчивость и экстремальные явления, с которыми система не может совладать». Уязвимость характеризует предрасположенность системы понести ущерб, обусловленный неблагоприятным воздействием изменения климата. Под неблагоприятными воздействиями понимаются воздействия, затрудняющие нормальное функционирование системы в соответствии с ее целевым предназначением и обусловленные как экстремальными погодными и климатическими событиями, так и климатическими трендами.

Согласно IPCC 2007 [17], уязвимость систем к изменению климата определяется посредством следующих трех компонентов:

- подверженность систем неблагоприятным воздействиям, обусловленным изменением климата (*exposure*), выражающаяся, например, в виде некоторого ущерба (материального или нематериального), являющегося следствием природных событий, возможность появления которых обусловлена климатическими изменениями (таким событием может быть, например, экстремальная температура в каком-либо регионе);

- чувствительность систем к изменению климата (*sensitivity*), количественно характеризующая степень реакции системы на изменение климата (причем реакция систем может быть как положительной, так и негативной);

- адаптивный потенциал (адаптивная способность), присущий системе (*adaptive capacity*) и характеризующий степень нивелирования потенциально-возможного ущерба, который может быть нанесен системе как результат изменения климата.

Следовательно, уязвимость может быть представлена формально (рис. 5) в виде следующей функциональной зависимости:

$$V = f(E, S, A_c),$$

где  $E$  — подверженность системы воздействию климатических изменений;  $S$  — чувствительность системы к изменению климата;  $A_c$  — адаптивная способность системы и  $f$  — некоторая функция, определяемая эмпирическим путем для каждой рассматриваемой системы.

Роль и место уязвимости в системе климатического риск-менеджмента, а также факторы, ее обуславливающие, показаны на рис. 6. Очевидно, что система является сильно уязвимой, если ее чувствительность к малым изменениям климата высока, негативные последствия климатических изменений значительны, а адаптационные способности системы сильно ограничены. Для определения уязвимости три компонента, от которых она зависит ( $E$ ,  $S$  и  $A_c$ ), необходимо выразить количественно. Данная процедура осуществляется с помощью некоторого набора показателей (как качественных, так и количественных), которые затем преобразуются в интегрированный индекс — уязвимость. Показатели, относящиеся к подверженности риску и чувствительности



Рис. 5. Формальное представление «уязвимости»

Fig. 5. Formal presentation of “vulnerability”

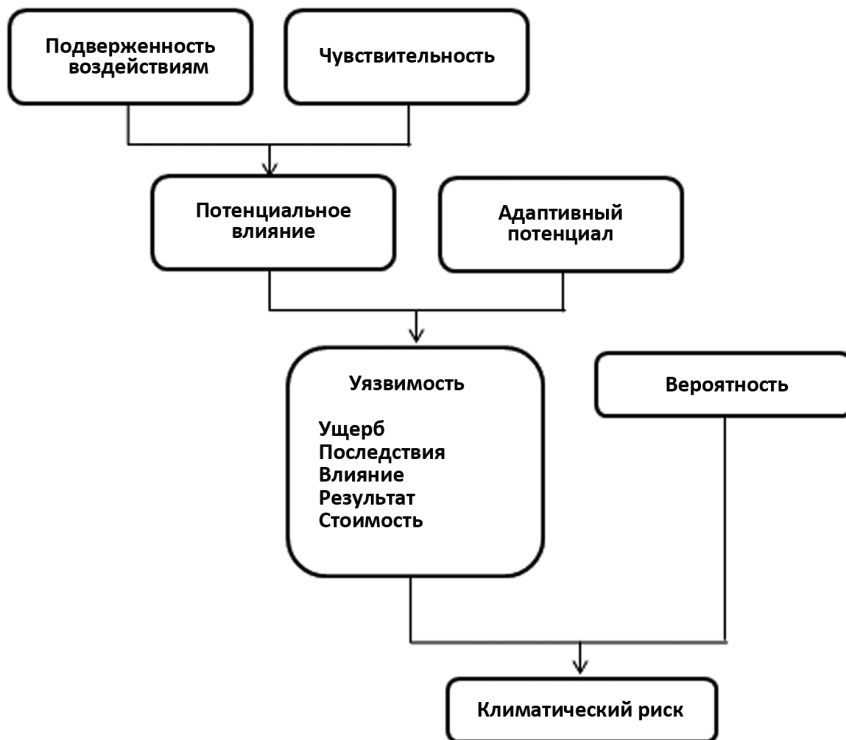


Рис. 6. Роль, место и обуславливающие факторы «уязвимости» в системе климатического риск-менеджмента

Fig. 6. Role, position and factors responsible for “vulnerability” in the system of climate risk management

системы, имеют физический и биологический смысл, а показатели, относящиеся к адаптивной способности, — экономический смысл. Таким образом, для того, чтобы оценить уязвимость конкретной системы к трансформациям, происходящим в природе и обществе под влиянием изменения климата, необходимо иметь оценки трех указанных выше компонентов, которые в конечном счете определяют уязвимость. На рис. 6 под «вероятностью» понимается оценка вероятности возможности наступления рассматриваемого неблагоприятного погодно-климатического события.

В разрабатываемой методике три компонента — подверженность воздействиям, чувствительность и адаптационный потенциал — служат ключевыми факторами, на основе которых определяется уязвимость систем к изменению климата, а также осуществляется информационное обеспечение процессов оценки и уменьшения последствий климатических угроз. Как отмечается в многочисленных публикациях, одной из основных задач при оценке уязвимости является определение так называемых локальных (местных) показателей уязвимости, привязанных к конкретному, небольшому по площади, географическому региону. Это обусловлено тем, что адаптационные меры разрабатываются на местном уровне (уровень региона или муниципалитета, поскольку пространственная протяженность отдельных субъектов федерации может быть очень значительной) структурами планирования органов местного управления, а также руководителями отдельных предприятий. Однако глобальные показатели уязвимости также принимаются во внимание при оценке локальных показателей уязвимости. В результате подверженность воздействию, чувствительность и адаптационный потенциал природных и социально-экономических систем должны оцениваться на местном уровне с привлечением информационных ресурсов федеральных органов государственного управления и научных организаций.

Как правило, для оценки локальной уязвимости используется так называемый подход «снизу вверх», который концентрируется на оценке уязвимости различных систем, расположенных на относительно малых территориях. Уязвимость при этом рассматривается относительно климатической изменчивости, а не относительно долгосрочных климатических трендов. Алгоритм «снизу вверх» в полной мере «вписывается» в существующие системы поддержки принятия управленческих решений органами власти. Оценка уязвимости сосредотачивается на оценке ущерба, обусловленного изменением климата, с целью максимизации потенциальных выгод и минимизации возможных потерь, а оценка адаптационных возможностей фокусируется на адаптационных мерах, повышающих устойчивость и надежность социально-экономических систем к изменению климата.

Подход «снизу вверх» основан на признании важности детализации при оценке рисков и выработке адаптационной политики. По этой причине анализ начинается с локального масштаба, оценки текущих и возникающих рисков, социальных и экологических факторов, лежащих в основе оценки риска, и потенциала риск-менеджмента. И только потом осуществляется долгосрочное планирование и разрабатываются адаптационные сценарии будущего.

Алгоритм разрабатываемой методики определения уязвимости включает в себя следующую последовательность шагов:

– климатическое районирование Российской Арктики (материковой и морской частей), т.е. разделение ее территории на области с более или менее однородными климатическими условиями;

– формирование вектора индикаторов изменения климата, компонентами которого являются как глобальные показатели (например, объем годовой эмиссии парниковых газов в мире и отдельных экономических конгломераций, величина роста среднглобальной приповерхностной температуры), так и индикаторы, отражающие региональные особенности глобального изменения климата (например, арктическое усиление, площадь ледяного покрова);

– функциональное зонирование Арктического региона, т.е. разделение его территории на области с однородными видами хозяйственной и/или иной деятельности экономических субъектов;

– сопряжение зон с однородными климатическими условиями с зонами с однородными видами хозяйственной деятельности и на этой основе выделение территориальных образований (ТО), в рамках которых предполагается определять показатели уязвимости;

– составление реестра систем (природных, социально-экономических) для каждого ТО. Инвентаризация систем является основой для оценки подверженности воздействию изменения климата данного ТО. Заметим, что подверженность воздействию является необходимым, но недостаточным фактором оценки уязвимости

Таблица

**Суммарные показатели уязвимости для данного (конкретного) сектора (города, предприятия)\***

Компонент	Возможные индикаторы	
Подверженность воздействию	– прибрежные морфологические процессы (эрозия береговой зоны, затопление прибрежных низин и заболоченных земель, засоленность поверхностных и грунтовых вод и др.), – волновая активность и приливные волны, – экстремальные погодные явления, – повышение уровня моря, – динамика прибрежных вод	
Чувствительность	Население	Влияние изменения климата на население, проявляющееся, например, в росте заболеваний
	Прибрежные города и поселки	Изменение экономических показателей субъектов экономической деятельности
	Прибрежные экосистемы	Миграция видов
	Рыбное хозяйство	Изменение продуктивности рыбных запасов
	Прибрежный туризм	Изменение экономических показателей отелей и баз отдыха
Адаптационный потенциал	Экономика	Степень зависимости от морской деятельности (в частности, от рыболовства и грузоперевозок)
	Инфраструктура	Состояние строений, жилищ и дорог в прибрежной зоне
		Состояние дренажных систем
	Индивидуумы	Доступность медицинских учреждений
Местная власть	Признание факта влияния изменения климата	
		Степень влияния местных органов управления на социальную и экономическую деятельность

\* В качестве примера — некоторые суммарные показатели уязвимости для прибрежной зоны западного сектора Российской Арктики

и, следовательно, климатического риска. Система (регион, ТО) может быть подвергнута воздействию, но не быть уязвимой;

– оценка чувствительности природных и антропогенных систем к изменению климата. В идеале для этой цели целесообразно использовать эконометрические модели, в которых вектор входных параметров включает в себя параметры, характеризующие климатическую систему и изменения, происходящие в ней. Однако для верификации таких моделей необходима ретроспективная информация, которая в силу объективных причин зачастую отсутствует;

– определение пороговых значений индикаторов изменения климата для отдельных систем;

– формирование основных индикаторов уязвимости каждой конкретной системы к изменению климата (в основном методом экспертных оценок) (см. таблицу).

## ВЫВОДЫ

Целью идентификации климатического риска является определение источников риска и тех неблагоприятных событий, которые могут повлиять на эффективность функционирования рассматриваемой системы. Идентификация риска и его анализ выполняются на основе информации о внешней по отношению к системе среде, факторах риска и самой системы (процесса), подверженной климатическому риску. Вторая проблема — определение чувствительности изучаемых систем к климатическим риск-факторам. Для оценки климатического риска, когда риск-факторы известны, требуется разработка адекватных математических моделей социально-экономических и природных систем.

На основе анализа воздействия изменений климата на природные и хозяйственные системы и население Арктики сформирован реестр рисков, обусловленных климатическими изменениями. Предложена концептуальная модель оценки воздействия изменения климата на различные системы. Оценка влияния изменения климата на системы (природные, социальные, экономические) предполагает наличие информации о стресс-факторах (сценарии изменения климата, как в масштабах планеты, так и в Российской Арктике), формулировку целей оценки, определение субъектов, представляющих интерес (сектора экономики, регионы и др.), обоснование требований к входным данным, математическим моделям и методам. Результат оценки — показатели как качественные («значительное влияние», «слабое влияние» и т.д.), так и количественные (коэффициенты чувствительности).

Выделены основные проблемы в идентификации климатического риска в Арктике. Арктика — очень специфический регион с точки зрения происходящих в нем климатических изменений под влиянием глобального изменения климата. Данное обстоятельство предъявляет высокие требования к составлению перечня риск-факторов для основных систем, находящихся в Арктическом регионе, и социально-экономических процессов, происходящих в нем. Вторая проблема — определение чувствительности изучаемых систем к климатическим риск-факторам. В идеальном случае для решения данной проблемы необходимо иметь соответствующие математические модели рассматриваемых систем. Исследование этих моделей в пространстве параметров позволит сделать вывод о том, насколько та или иная система подвержена климатическому риску.

Индикаторами изменения климата в Арктике могут служить приповерхностная температура воздуха, площадь морского льда и повторяемость опасных гидрометеорологических явлений в морской Арктике и отдельных ее районах, которые являются наиболее важными факторами, влияющими на хозяйственную деятельность.

В области морской Арктики самым теплым за период наблюдений с 1951 г. оказался 2016 год. Средняя приповерхностная температура воздуха (ПТВ) зимой в этот год по данным 41 станции составила  $-19,3$  °С. Летом средняя температура 2016 г. стала второй в ряду теплых летних сезонов. В 2017 г. обе температуры понизились, особенно летом. Минимальная среднемесячная площадь морского льда в 2017 г., наблюдаемая в сентябре, составила 4,74 млн км<sup>2</sup>, что является седьмым значением в ряду минимальных значений за период с 1979 г. Морской ледяной покров в арктических морях летом быстро сокращается начиная с 1998 г. В последние 13 лет его площадь в сентябре колеблется около 200 тыс. км<sup>2</sup>, что в 6 раз меньше, чем в 1996–1998 гг. Тренд повторяемости дней с низкой температурой воздуха морях в ноябре–марте с 1995 по 2015 гг. отрицательный. Тренды повторяемости дней с ветром более 15 м/с с ноября по март за 1995–2015 г. в морях Баренцевом, Лаптевых, Восточно-Сибирском исчезающе малые — относительная дисперсия тренда менее 5 %. Только в Карском море и в Чукотском море (положительный тренд) относительная дисперсия составила 10–35 %.

В разрабатываемой методике три компонента — подверженность к воздействиям, чувствительность и адаптационный потенциал — служат ключевыми факторами, на основе которых определяется уязвимость систем к изменению климата, а также осуществляется информационное обеспечение процессов оценки и уменьшения последствий климатических угроз. Алгоритм разрабатываемой методики определения уязвимости включает в себя последовательность из 7 шагов: 1) климатическое районирование Российской Арктики, формирование вектора индикаторов изменения климата, компонентами которого являются как глобальные показатели, так и индикаторы, отражающие региональные особенности глобального изменения климата; 2) функциональное зонирование Арктического региона; 3) сопряжение зон с однородными климатическими условиями с зонами с однородными видами хозяйственной деятельности и на этой основе выделение территориальных образований (ТО); 4) составление реестра систем (природных, социально-экономических) для каждого ТО; 5) оценка чувствительности природных и антропогенных систем к изменению климата; 6) определение пороговых значений индикаторов изменения климата для отдельных систем; 7) формирование основных индикаторов уязвимости каждой конкретной системы к изменению климата.

**Благодарности.** Статья подготовлена по результатам проектов 1.3.3.1 и 1.3.4.2 ЦНТП Росгидромета.

**Acknowledgments.** The article was prepared based on the results of the projects of 1.3.3.1 and 1.3.4.2 of the Roshydromet CSTP.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Матишов Г.Г., Чилингаров А.Н. Объект изучения — российская Арктика // Вестник РАН. 2002. Т. 72. № 8. С. 687–691.
2. Филиппов В.В., Жуков М.А. Проблемы экономического развития арктической зоны Российской Федерации // НЭП – XXI век. Наука. Экономика. Промышленность. 2006. № 2. С. 19–22.

## REFERENCES

1. Matishov G.G., Chilingarov A.N. Object of research – Russian Arctic // *Vestnik Rossiiskoi Akademii Nauk*. Bulletin of the Russian Academy of Sciences. 2002, 72 (8): 687–691. [In Russian].
2. Filippov V.V., Zhukov M.A. Problems of Russian Arctic zone economic development. *NEP – XXI vek. Nauka. Ekonomika. Promyshlennost'*. NEP – XXI Century. Science Economy Industry. 2006, 2: 19–22. [In Russian].

3. Матишов Г.Г., Дженюк С.Л. Проблемы управления морским природопользованием и обеспечения экологической безопасности в российской Арктике // Вестник Мурманского государственного технического университета. 2014. Т. 3. С. 531–539.
4. Порфирьев Б.Н. Глобальные климатические изменения: новые риски и новые возможности экономического развития страны // Российский экономический журнал. 2009. № 6. С. 66–76.
5. Селин В.С., Васильев В.В. Тенденции и риски хозяйственной деятельности в Арктике в условиях долговременных климатических изменений // Арктика и север. 2011. № 1. С. 125–133.
6. Катцов В.М., Порфирьев Б.Н. Климатические изменения в Арктике: последствия для окружающей среды и экономики // Арктика: экология и экономика. 2012. № 2 (6). С. 66–79.
7. Данилов А.И., Алексеев Г.В., Клепиков А.В., Ковалевский Д.В., Пересыпкин В.И. Морская деятельность в Арктике // Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М.: Росгидромет, 2014. С. 898–917.
8. Дмитриев В.Г., Ковалевский Д.В., Алексеев Г.В., Бобылев Л.П. К оценке рисков, обусловленных неблагоприятными гидрометеорологическими явлениями и климатическими аномалиями в Арктике // Проблемы Арктики и Антарктики. 2012. № 4 (92). С. 52–62.
9. Soldatenko S.A., Alekseev G.V., Danilov A.I. A modeling system for climate change risk assessment, management and hedging in coastal areas // Proceedings of the Joint Conference “Managing risk to coastal regions and communities in a changing world” (EMECS’11 Sea Coast XXVI). August 22–27. St. Petersburg, 2016. P. 10.
10. Jones R. N., Boer R. Assessing Current Climate Risks // Adaptation Policy Frameworks for Climate Change: Developing Strategies, Policies and Measures / Lim B., Spanger-Siegfried E., Burton I., Malone E., Huq S. (eds.). Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2004. P. 91–117.
11. Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation /
3. Matishov G.G., Dzheniuk S.L. Problems of environmental management and supplying of ecological safety in Russian Arctic. *Vestnik Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. Bulletin of Murmansk State Technical University. 2014, 3: 531–539. [In Russian].
4. Porfir'ev B.N. Global climatic changes: new risks and new capabilities of economical country development. *Rossiiskii ekonomicheskii zhurnal*. Russian economic journal. 2009, 6: 66–76. [In Russian].
5. Selin V.S., Vasil'ev V.V. Tendencies and risks of economic activities in Arctic in conditions of long-term climatic changes. *Arktika i sever*: Arctic and North. 2011, 1: 125–133. [In Russian].
6. Kattsov V.M., Porfir'ev B.N. Climate changes in Arctic: consequences for environment and economy. *Arktika: ekologiya i ekonomika*. Arctic: ecology and economy. 2012, 2 (6): 66–79. [In Russian].
7. Danilov A.I., Alekseev G.V., Klepikov A.V., Kovalevskii D.V., Peresyypkin V.I. Maritime activities in the Arctic. Second assessment report of Roshydromet on climate change and its impact on the territory of the Russian Federation. Moscow: Roshydromet, 2014: 898–917. [In Russian].
8. Dmitriev V.G., Kovalevskii D.V., Alekseev G.V., Bobylev L.P. On estimation of risks defined by adverse hydrometeorological conditions and climatic anomalies in Arctic. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Problems of Arctic and Antarctic. 2012, 4 (92): 52–62. [In Russian].
9. Soldatenko S.A., Alekseev G.V., Danilov A.I. A modeling system for climate change risk assessment, management and hedging in coastal areas. Proc. of the Joint Conference “Managing risk to coastal regions and communities in a changing world” (EMECS’11 Sea Coast XXVI). St. Petersburg, August 22–27. 2016: 10.
10. Jones R. N., Boer R. Assessing Current Climate Risks. Adaptation Policy Frameworks for Climate Change: Developing Strategies, Policies and Measures. Lim B., Spanger-Siegfried E., Burton I., Malone E., Huq S. (eds.). Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2004: 91–117.
11. Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation.

- C.B. Field, V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, P.M. Midgley (Eds.) // A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK, and New York, USA: Cambridge University Press, 2012. P. 582.
12. *Bowyer P., Bender S., Rechid D., Schaller M.* Adapting to Climate Change: Methods and Tools for Climate Risk Management. Climate Service Centre, Germany, 2014. 124 p.
13. *Papathoms-Köhle M., Promper C., Glade T.* A common methodology for risk assessment and mapping of climate change related hazards – implications for climate change adaptation policies // *Climate*. 2016. V. 4 (1). P. 1–23.
14. ГОСТ Р ИСО/МЭК 31010-2011 «Менеджмент риска. Методы оценки риска». Федеральное Агентство по техническому регулированию и метрологии. М.: Стандартинформ, 2011. 74 с.
15. *Миронов Е.У., Смирнов В.Г.* Разработка экспериментального аппаратнопрограммного комплекса спутникового мониторинга и прогноза ледовой обстановки в зоне архипелага Шпицберген и в Западной Арктической зоне РФ // *Российские полярные исследования*. 2016. № 3 (25). С. 24–26.
16. *Алексеев Г.В.* Разработка экспериментального аппаратнопрограммного комплекса мониторинга и прогноза климатических изменений на архипелаге Шпицберген и в Западной Арктической зоне РФ // *Российские полярные исследования*. 2015. № 4 (22). С. 26–28.
17. IPCC (2007). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* / S. Solomon, D. Quin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor and H. L. Miller (eds.). United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, Cambridge, 996 p.
- C.B. Field, V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, P.M. Midgley (Eds.). *A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, USA, 2012: 582.
12. *Bowyer P., Bender S., Rechid D., Schaller M.* Adapting to Climate Change: Methods and Tools for Climate Risk Management. Climate Service Centre, Germany, 2014: 124 p.
13. *Papathoms-Köhle M., Promper C., Glade T.* A common methodology for risk assessment and mapping of climate change related hazards – implications for climate change adaptation policies. *Climate*. 2016, 4 (1): 1–23.
14. GOST R ISO/MEK 31010-2011 «Menedzhment riska. Metody otsenki riska». Federal'noe Agentstvo po tekhnicheskomu regulirovaniu i metrologii. Moscow: Standartinform, 2011: 74 p. [In Russian].
15. *Mironov E.U., Smirnov V.G.* Development of experimental hardware environment for satellite monitoring and sea-ice conditions forecast in Svalbard area and Western Arctic zone of Russian Federation. *Rossiiskie poliarnye issledovaniia*. Russian Polar Investigations. 2016, 3 (25): 24–26. [In Russian].
16. *Alekseev G.V.* Development of experimental hardware environment for climate change monitoring and forecast in Svalbard area and Western Arctic zone of Russian Federation. *Rossiiskie poliarnye issledovaniia*. Russian Polar Investigations. 2015, 4 (22): 26–28. [In Russian].
17. IPCC (2007). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* / S. Solomon, D. Quin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor and H. L. Miller (eds.). United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, Cambridge: 996 p.