

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ И МЕТОДЫ РАСЧЕТА ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ОКЕАНА

УДК 551.59

DOI: 10.22449/0233-7584-2022-4-372-388

Ансамбли опасных гидрометеорологических явлений: математическое моделирование, системы поддержки принятия решений, геоинформационные системы (обзор)

Н. А. Яицкая^{1, 2, ✉}, А. А. Магаева²

¹ *Федеральный исследовательский центр «Субтропический научный центр
Российской академии наук», Сочи, Россия*

² *Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук,
Ростов-на-Дону, Россия
✉ yaitskayan@gmail.com*

Поступила в редакцию 27.12.2021; одобрена после рецензирования 20.04.2022;
принята к публикации 04.05.2022

Цель. Выполнен анализ современного состояния исследований и достижений в области опасных природных (в том числе гидрометеорологических) явлений и их ансамблей (мультиопасных явлений) на основе работ, опубликованных в профильных рейтинговых международных и российских научных журналах и монографиях.

Методы и результаты. Рассмотрены современные методы математического моделирования мультиопасных гидрометеорологических явлений, методы оценки взаимосвязей между опасными и мультиопасными явлениями, существующие системы поддержки принятия решений и методы оценки рисков возникновения опасных и мультиопасных природных явлений. Выполнен обзор ансамблевых моделей и возможностей облачных вычислений; исследован опыт интеграции геоинформационных систем и результатов дистанционного зондирования Земли в моделях. Представлены примеры разработки в разных странах платформ для моделирования и систем поддержки принятия решений при возникновении опасных явлений.

Выводы. Показано, что проблемы, связанные с прогнозированием, мониторингом и минимизацией последствий опасных природных явлений и их сочетаний, требуют междисциплинарных решений и взаимодействия между всеми заинтересованными сторонами – обществом, властью, наукой, бизнесом. Важно разрабатывать и внедрять планы по интегрированному управлению в регионах, особенно подверженных рискам. Первостепенное значение имеют данные натурных наблюдений. На страновом уровне необходима разработка комплексной системы моделирования для учета сложных процессов, какими являются опасные явления. Отдельно необходимо учитывать особенности стихийных бедствий, происходящих в северных районах нашей страны, для которых характерны зачастую экстремальные фоновые показатели погодных условий, труднодоступность и удаленность, отсутствие необходимой инфраструктуры для спасения людей и ликвидации последствий.

Ключевые слова: опасные природные явления, шторм, лед, паводки, геоинформационные системы, математическое моделирование, реанализ, система поддержки принятия решений, планирование, управление риском

Благодарности: исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-15-50320 (в части обзора систем поддержки принятия решений и оценки рисков возникновения опасных и мультиопасных природных явлений) и в рамках реализации ГЗ ЮНЦ РАН, № гр. проекта 122013100131-9 (в части обзора математических моделей мультиопасных гидрометеорологических явлений).

© Яицкая Н. А., Магаева А. А., 2022

Для цитирования: Яицкая Н. А., Магаева А. А. Ансамбли опасных гидрометеорологических явлений: математическое моделирование, системы поддержки принятия решений, геоинформационные системы // Морской гидрофизический журнал. 2022. Т. 38, № 4. С. 372–388. doi:10.22449/0233-7584-2022-4-372-388

Hydrometeorological Phenomena and Multi-Hazards: Mathematical Modelling, Decision Support Systems, Geoinformation Systems (Review)

N. A. Yaitskaya^{1, 2, ✉}, A. A. Magaeva²

¹ Federal Research Centre the Subtropical Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences,
Sochi, Russia

² Federal Research Centre the Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences,
Rostov-on-Don, Russia
✉ yaitskayan@gmail.com

Abstract

Purpose. The article represents the analysis of current state of research and achievements in the field of natural hazards (including hydrometeorological ones), and their ensembles (multi-hazards) based on the papers published in the specialized international and Russian scientific journals and monographs.

Methods and Results. Considered are the modern methods for mathematical modeling of hydrometeorological multi-hazards, the methods for assessing the relations between the hazards and multi-hazards, the existing decision support systems, and the methods for assessing the risks of occurrence of hazards and multi-hazards. The ensemble models and the possibilities of cloud computing were reviewed; the experience of integrating the geoinformation systems and the results of the Earth remote sensing in models was studied. Examples of the modeling platforms and the decision support systems (developed in different countries) intended for application in case of the natural hazards, are represented.

Conclusions. It is shown that solution of the problems including forecasting, monitoring and minimizing the consequences of natural hazards and their combinations requires interdisciplinary solutions, on the one hand, and interaction between all the stakeholders – society, government, science and business, on the other. It is important to develop and implement an integrated management in the regions that are particularly at risk. Field observations are of primary importance. Within the framework of the country, an integrated modeling system taking into account complex processes such as hazards, should be necessarily developed. Special attention should be paid to the peculiarities of natural disasters occurring in the northern regions of our country, since they are often characterized by extreme background weather conditions, inaccessibility and remoteness, lack of the infrastructure required for saving people and eliminating the consequences.

Keywords: natural hazards, storm, ice, flood, geographic information system, mathematical modeling, reanalysis, decision support system, planning, risk management

Acknowledgements: the study was carried out at the RFBR financial support within the framework of scientific project No. 20-15-50320 (review of the decision support systems and the assessment of a risk of occurrence of natural hazards and multi-hazards), and within the framework of the state assignment of SSC RAS, project No. 122013100131-9 (review of mathematical models of hydrometeorological multi-hazards).

For citation: Yaitskaya, N.A. and Magaeva, A.A., 2022. Hydrometeorological Phenomena and Multi-Hazards: Mathematical Modelling, Decision Support Systems, Geoinformation Systems (Review). *Physical Oceanography*, 29(4), pp. 347-362. doi:10.22449/1573-160X-2022-4-347-362

Введение

В соответствии с отчетом Всемирного банка об основных очагах стихийных бедствий [1], около 3,8 млн км² земель и 790 млн человек в мире подвержены потенциальной угрозе возникновения минимум двух опасных явлений, МОРСКОЙ ГИДРОФИЗИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ том 38 № 4 2022

около 0,5 млн км² и 105 млн человек – трех и более опасных явлений [2]. В отчете Организации Объединенных Наций¹ рассмотрены возможные угрозы возникновения нескольких стихийных бедствий для жителей городов (с населением 300 000 человек и более): например, в 2014 г. 100 млн человек проживало в районах, которые были подвержены высокому риску возникновения мультиопасных природных явлений, а 752 млн (34 % от всего городского населения) подвергались среднему или низкому риску [3].

Согласно специальному докладу «Управление рисками экстремальных явлений и бедствий для содействия адаптации к изменению климата» Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК), приблизительно с 1950 г. наблюдается увеличение повторяемости природных опасностей.

Существует несколько типов экстремальных климатических явлений, которые, по мнению [4] МГЭИК, станут более частыми, распространенными или более интенсивными в большинстве частей мира в течение XXI в. К ним относятся периоды сильной жары, засухи и сильные дожди. Повышенный риск возникновения опасностей может также наблюдаться вследствие антропогенного воздействия², например изменение землепользования увеличило опасность лесных пожаров в Средиземноморье [5].

Интегрированное управление прибрежной зоной опирается на комплексные и тщательно продуманные меры, предлагаемые заинтересованными сторонами, и активное распространение информации на местном уровне. Это требует мониторинга, регулирования и ответственного управления. На современном этапе развития науки достоверное прогнозирование гидрометеорологических явлений возможно лишь с заблаговременностью 72 ч. Это значение объясняется в первую очередь оправдываемостью математических моделей, скоростью вычислений, количеством данных для верификации моделей.

Для эффективного прогнозирования опасностей и предотвращения их неблагоприятных последствий необходимо сосредоточить внимание на природе опасностей и рисков и их последствиях в пространственном масштабе как на региональном, так и на национальном уровне.

Несмотря на развитие различных систем, использующих технологии обучения и прогнозирования для смягчения последствий стихийных бедствий, эффективное прогнозирование стихийных бедствий и управление рисками по-прежнему остается проблемой во всем мире.

В настоящей работе на основе анализа отечественной и зарубежной научной литературы с 2005 г. рассмотрены следующие аспекты в изучении опасных и мультиопасных природных явлений:

1) математическое моделирование мультиопасных гидрометеорологических явлений;

¹ Risks of exposure and vulnerability to natural disasters at the city level: A global overview / D. Gu [et al.]. New York : UN, 2015. 40 p. (United Nations Technical Paper; No. 2015/2).

² Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation : special report of the intergovernmental panel on climate change / Eds. C. B. Field, V. Barros, T. F. Stocker [et al.]. Cambridge : Cambridge University Press, 2012. 582 p. URL: <https://www.ipcc.ch/report/managing-the-risks-of-extreme-events-and-disasters-to-advance-climate-change-adaptation/> (date of access: 19.04.2022).

- 2) использование облачных сервисов для моделирования опасных природных явлений, раннего предупреждения населения и управления рисками;
- 3) разработка системы поддержки принятия решений и оценки рисков возникновения опасных и мультиопасных природных явлений.

1. Материалы и методы

Для работы были отобраны научные публикации из полнотекстовой коллекции электронных журналов издательства *Springer*, полнотекстовой базы данных *ScienceDirect* издательства *Elsevier* и научной электронной библиотеки *E-Library*. Поиск осуществлялся на платформах этих издательств и в международных научных базах данных *Scopus* и *Web of Science* по ключевым словам «опасные природные явления», «мультиопасные явления», «шторм», «нагон», «паводок», «лед», «реанализ», «база данных», «система поддержки принятия решений», «математическое моделирование», «планирование», «правительство», «управление риском», «уязвимость» и их английским эквивалентам. Поиск охватывал временной период с 2005 по 2021 г. Было выбрано 311 статей и монографий на английском и 49 – на русском языке.

Основной объем информации получен из журналов «Океанология», «Водные ресурсы», «Метеорология и гидрология», «*Progress in Oceanography*», «*Mathematical Modeling*», «*Oceanologia*», «*Ocean Modelling*», «*Journal of Marine Systems*», «*Ocean and Coastal Management*», «*Marine Policy*», «*Coastal Engineering*», «*Cold Region Science and Technology*», «*International Journal of Disaster Risk Reduction*», «*Quaternary Science Reviews*», «*Environmental Impact Assessment Review*», «*Weather and Climate Extremes*», «*Journal of Environmental Management*» и др. Наибольшее количество научных статей найдено по оценке риска и управлению рисками, системам предупреждения и прогнозирования опасных природных явлений (ОПЯ), наводнениям, штормовому волнению. В литературный обзор вошло 224 научных работы на английском и 32 – на русском языке.

2. Математическое моделирование мультиопасных гидрометеорологических явлений

Для прогнозирования и эффективного управления стихийными бедствиями построен широкий спектр моделей. К ним относятся модели распространения наводнений *Swift* [6], *Rapid Flood Spreading Model (RFSM)* [7], модель прогнозирования оползней *LHASA* [8], модели циклонов (модель исследования и прогнозирования погоды ураганов *HWRF*)³ и многие другие [9]. Некоторые программные комплексы учитывают до трех типов опасных явлений, но как независимо происходящих (*HAZUS-MH* [10], *InaSAFE* [11] и *RiskScape* [12, 13]).

Для анализа опасных природных явлений климатические переменные могут быть получены из рядов наблюдений или из глобальных и региональных климатических реанализов, как было показано в предыдущей нашей работе⁴.

³ Hurricane Weather Research and Forecasting (HWRF) model: 2011 scientific documentation / S. Gopalakrishnan [et al.]. 2011. 96 p.

⁴ Яицкая Н. А., Магаева А. А. Ансамбли опасных гидрометеорологических явлений: нормативно-правовые аспекты, терминология и классификация (обзор) // Морской гидрофизический журнал. 2022. Т. 38, № 3. С. 256–275. doi:10.22449/0233-7584-2022-3-256-275

Это категории основных переменных (например, температура, осадки, скорость ветра), сложных переменных (таких как испарение или влажность), а также косвенных переменных (в частности, влажность почвы, расход рек или скорость потока) ⁵. Выбранные переменные должны быть репрезентативными и отражать не только пространственно-временную динамику, но и аномальные и экстремальные значения.

Более сложная задача – количественная оценка взаимосвязей между опасностями и расчет мультиопасностей. Для этого может применяться несколько типов вероятностных методологий (например, байесовские сети, анализ дерева событий, моделирование методом Монте-Карло), которые обычно используются для оценки природных опасностей.

Однако основной проблемой по-прежнему остаются неопределенности, связанные с будущими изменениями климата и вкладом этих изменений в характеристики ОПЯ. Решить эту проблему возможно, используя ансамбли глобальных и региональных моделей. Мультимодельные ансамбли создаются на основе результатов различных экспериментов по моделированию ⁶, характеризуются большей надежностью и согласованностью, чем одномодельные симуляции, и обеспечивают более высокий уровень достоверности климатических прогнозов для конкретного региона [14]. Наиболее широко используемыми для создания климатических сценариев являются модели общей циркуляции (см. работу ⁷ и [15–18]). Для получения корректных данных о глобальных климатических изменениях используется несколько различных сценариев, результаты расчетов по которым публикуются с периодичностью примерно пять лет в специальных отчетах [19].

3. Облачные вычисления и ансамблевое моделирование

Широкое внедрение геопространственных моделей и моделей природных опасностей, необходимость обработки все большего количества разнородной информации послужили причиной разработки и распространения методов облачных вычислений. Чрезвычайно сложный характер моделей, ресурсоемкость вычислений, особые временные требования при прогнозировании, потребность в масштабируемости для ансамблей моделей и ресурсоемкий характер геопространственных моделей – все это делает реализацию таких моделей сложным процессом [20].

Разработанные на основе принципов распределенных вычислений облачные вычисления возможно объединять, совместно использовать, интегрировать в них новейшие вычислительные технологии и физически распределенные компьютерные ресурсы [21]. Облачные вычисления обеспечивают доступ по запросу к практически неограниченным хранилищам, сетевым и вычислительным ресурсам. Эти возможности позволяют решать проблемы, связанные

⁵ Climate adaptation: Risk, uncertainty and decision-making : UKCIP Technical Report. Oxford : UKCIP, 2003. Part 2. P. 41–87.

⁶ URL: <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-ii/> (дата обращения: 20.07.2021).

⁷ Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Eds. T. F. Stocker [et al.]. Cambridge : Cambridge University Press, 2013. 1535 p.

с количеством исходных и полученных данных, объемом вычислений и одно-временным доступом к расчетам и результатам неограниченного количества пользователей.

В работе ⁸ С. Ён с соавторами использовали ГИС в сочетании с веб-технологиями при разработке инструмента поддержки принятия решений для определения эффективных стратегий реагирования на сильные землетрясения и оценки ожидаемых повреждений и потерь. В [22] Ф. Векс с соавторами предложили модель поддержки принятия решений, основанную на эвристике Монте-Карло с использованием географической информации для *NDM (Natural Disaster Management)*. Эта модель минимизировала сумму времени завершения инцидентов, взвешенную по серьезности инцидентов.

В работе [23] К. ван Вестен продемонстрировал, как ГИС может быть объединена со спутниковым мониторингом для разработки эффективных инструментов управления рисками возникновения стихийных бедствий для предотвращения последствий и обеспечения готовности к ОПЯ, оказания помощи пострадавшим и восстановления инфраструктуры на различных этапах бедствий. В [24] М. Лайгури и К. Кодрич объединили ГИС и возможности интернета, чтобы повысить эффективность реагирования на стихийные бедствия большой силы и управления последствиями от их возникновения. В [25] А. Джеясилан подтвердил эффективность использования ГИС, интегрированных с данными дистанционного зондирования Земли, для раннего предупреждения наводнений и засухи, мониторинга в реальном времени и оценки последующего ущерба. В своих работах Л. Манфре с соавторами [26] и Л. Монтойя [27] продемонстрировали эффективность использования ГИС вместе с дистанционным зондированием и соответствующими технологиями для более эффективного управления рисками возникновения стихийных бедствий и городскими рисками, в том числе на территории крупных городов. В [28] С. Каттер объяснил, в какой степени геоинформационная наука может использоваться сообществом для управления после стихийных бедствий.

Веб-технологии применяются для размещения информации различных служб, связанных со стихийными бедствиями, облегчения доступа к данным наблюдений, результатам реанализа и прогноза стихийных бедствий. Различные типы датчиков используются для сбора максимально возможного количества информации, чтобы получить более полное представление о бедствиях. В работе [29] описано применение спутниковых данных и эффективных методов анализа изображений для быстрого создания карт во время стихийных бедствий с целью улучшения управления рисками.

Некоторые геопространственные модели и модели опасностей требуют запуска большого количества симуляций, чтобы получить ряды статистических показателей, а не один детерминированный результат. Этот подход часто применяется, когда входные данные в модели подвержены влиянию источников неопределенности и могут быть выражены только в виде вероятностных распределений, а не фиксированных величин. Облачная среда хорошо подходит для поддержки ресурсоемких ансамблей моделей, требующих запуска от сотен

⁸ Web based decision support tool in order to response to strong earthquakes / C. Yong [et al.] // Proceedings of TIEM S2001. Oslo, Norway, 2001.

до тысяч имитаций. В работе [30] С. Гарг с соавторами исследовали возможность использования облачных вычислений для ансамблевого запуска моделей геопространственных наук, разработав сервис *SparkCloud* для программного обеспечения прогнозирования лесных пожаров *Spark*. В [21] К. Хуанг с коллективом соавторов разработали прототип платформы гибридных облачных вычислений (*Hybrid Cloud Computing*, сокр. *НСС*), которая позволяет использовать облачную инфраструктуру для ансамблевого запуска сложной модели, например модели пылевой бури, развернув параллельный режим модели на базе *Amazon EC2*, с меньшими затратами по сравнению с локальными ресурсными вычислениями. В [31] З. Ли с коллегами разработали сервис *MaaS (Model as a Service)*, который запускает ансамбль моделей параллельно с отдельными запросами от пользователей. Все необходимые данные для запуска ансамбля загружаются пользователями через веб-интерфейс. В [32] Б. Бехзад с соавторами разработали геоинформационную систему на основе киберинфраструктуры *CyberGIS Gateway* и представили с ее помощью ансамблевое моделирование системы подземных вод в облачной среде на базе платформы *Microsoft Windows Azure*.

4. Системы предупреждения

Многие системы раннего предупреждения были разработаны для оповещения населения об ОПЯ [33–37]. В [34] Д. Путал с группой исследователей представили разработку, поддерживающую обнаружение опасных явлений и формирование оповещений путем анализа потока больших данных в реальном времени. В [36] К. Росси с соавторами представили сервис-ориентированную облачную архитектуру для серверов мобильных приложений, дающую возможность отправлять данные полевых наблюдений в режиме реального времени. Эти данные могут использоваться для раннего предупреждения во время стихийных бедствий. Веб-платформа *Virtual Fire* [33] предоставляет жизненно важные данные о погоде, необходимые для предотвращения пожаров и раннего предупреждения населения в случае пожара. Облачная вычислительная платформа на базе местных общин, предложенная Д. Ли с коллективом соавторов [37], будет способствовать раннему предупреждению о стихийных бедствиях, разработке стратегии управления чрезвычайными ситуациями и поможет свести к минимуму последствия стихийного бедствия. В исследовании, проведенном А. Джеясилан [25], рассматривается использование дистанционного зондирования и ГИС для своевременного предупреждения населения в случае любых событий, связанных с засухой и наводнениями.

Проект *RiskMed (Weather Risk Reduction in the Mediterranean)*⁹ собрал различных партнеров из четырех регионов Средиземноморской Европы (Южная Италия, Мальта, Северо-Западная Греция и Кипр) с целью создания и настройки системы раннего предупреждения о неблагоприятных погодных условиях, которая продолжит работать и после завершения проекта.

Armagedom – инструмент анализа сейсмического риска, реализованный в различных городских сейсмических условиях (Бузареа (Алжир), четыре про-

⁹ URL: <http://www.riskmed.net> (date of access: 15.02.2021).

винции в Иране, французские департаменты, расположенные вдоль французо-испанской границы, и заморские департаменты на Французских Английских островах) [38].

Central American Probabilistic Risk Assessment – платформа, которая включает в себя инструменты моделирования и анализа различных типов ОПЯ, уязвимостей, оценки рисков и др. Использовалась для реализации различных проектов стран Центральной и Южной Америки. Платформа включает в себя модули для анализа землетрясений, ураганов, осадков, вулканических угроз, оползней и наводнений. Модуль оценки рисков включает *CAPRA-GIS* и программные приложения для вероятностной оценки рисков на основе данных об ОПЯ, воздействии и физической уязвимости ¹⁰.

В России для математического моделирования опасных природных явлений применяются авторские модели, как отечественные, так и зарубежные. В работе [39] на основе климатической версии негидростатической модели *COSMO (Consortium for Small-scale Modeling)* впервые для России выполнено численно интегрирование модели на 30 лет (1985–2014 гг.) и получены массивы гидрометеорологической информации для трех вложенных областей Охотского моря с разным масштабом, проведен синоптический анализ экстремальных ситуаций. Прогностическая версия модели *COSMO-Ru* используется Гидрометцентром России.

Примером разработки российской оперативной системы диагноза и морских прогнозов Мирового океана, Арктического и Азово-Черноморского бассейнов является система, реализованная в Государственном океанографическом институте имени Н. Н. Зубова (ГОИН) [40, 41]. Комплекс численных моделей состоит из региональной негидростатической модели атмосферной циркуляции *Weather Research and Forecasting (WRF) Model* ¹¹; трехмерной σ -модели морской циркуляции *Institute of Numerical Mathematics Ocean Model (INMOM)* и динамики морского льда в версии для Баренцева, Белого, Печорского и Карского морей; российской атмосферно-волновой модели (РАВМ). Негидростатическая модель атмосферной циркуляции *WRF* с пространственным разрешением 15 км способна воспроизводить мезомасштабные атмосферные процессы ¹². Все атмосферные параметры из модели *WRF* используются в модели морской циркуляции *INMOM* для расчета потоков тепла, пресной воды и импульса на поверхности моря.

¹⁰ URL: <https://ecapra.org/topics/risk-assessment> (date of access: 05.03.2021).

¹¹ A Description of the Advanced Research WRF Version 3 / W. C. Skamarock [et al.]. Boulder, Colorado : National Center for Atmospheric Research USA, 2008. 125 p. (NCAR Technical Notes). doi:10.5065/D68S4MVH

¹² Дианский Н. А., Панасенкова И. И., Фомин В. В. Исследование отклика верхнего слоя Баренцева моря на прохождение интенсивного полярного циклона в начале января 1975 года // Морской гидрофизический журнал. 2019. Т. 35, № 6. С. 533. doi:10.22449/0233-7584-2019-6-530-548

5. Системы поддержки принятия решений и оценка рисков возникновения опасных и мультиопасных природных явлений.

Методы оценки рисков возникновения мультиопасных природных явлений

Концепция мультиопасных явлений связана с анализом различных соответствующих опасностей, триггерных и каскадных эффектов, угрожающих одним и тем же подверженным воздействию компонентам среды, с временным совпадением или без него. Методологии оценки риска возникновения мультиопасных явлений включают агрегирование опасностей, оценку уязвимости [42], присвоение баллов и весов выявленным классам [43]. Результаты позволяют качественно классифицировать уровень риска возникновения множественных опасностей (например, низкий, средний, высокий).

Термин «уязвимость» впервые появился в 1970-х гг. [44], когда уязвимость была указана как истинная причина бедствий наравне с естественными причинами возникновения ОПЯ. При этом не существует набора конкретных уязвимостей для различных объектов¹³. Как уже говорилось в нашей предыдущей работе⁴, уязвимость от ОПЯ отчасти определяется социальной уязвимостью населения. Так, бедные или развивающиеся сообщества несут большой ущерб от стихийных бедствий вследствие экономических и политических ограничений, ухудшения состояния окружающей среды [45].

На основе анализа современной научной литературы можно выделить два основных подхода к оценке опасностей: оценка рисков возникновения множества опасностей и оценка множества рисков. Эти подходы рассматривают одновременно опасность и уязвимость. Первый подход предусматривает анализ различных опасностей (с объединением их для расчета индекса множественных опасностей) и оценку общей территориальной уязвимости, что позволяет проводить оценку рисков возникновения множества опасностей. Процедуру оценки можно резюмировать следующим образом: оценка опасности; оценка множества опасностей; оценка подверженности опасности уязвимых элементов; оценка уязвимости; оценка риска возникновения множественных опасностей.

Второй подход – оценка множественных рисков – является более сложным и включает концепции множественных опасностей и множественной уязвимости с учетом возможных опасностей и взаимодействий уязвимостей [46]. При этом подходе риски анализируются отдельно для каждой опасности, а затем агрегирование позволяет провести оценку индекса множественного риска. В общем виде подход описывается следующей последовательностью: оценка опасности; оценка подверженности риску уязвимых элементов; оценка уязвимости; единая оценка риска; оценка множественных рисков.

Проект *H2020 ESPRESSO (Enhancing Synergies for Disaster Prevention in the European Union)* направлен на выявление существующих пробелов в исследованиях и ключевых приоритетов для научной работы в регионах, подверженных возникновению ОПЯ, снижение риска бедствий, управление рисками и адаптацию к изменению климата. Ключевые исследовательские приоритеты

¹³ Kohler A., Julich S., Bloemertz L. Guidelines: Risk analysis – a basis for disaster risk management. Eschborn : Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH, 2004. 31 p.

были сформулированы в Сендайской рамочной программе по снижению риска бедствий на 2015–2030 гг. и соответствующем Плане действий ЕС. Нововведение, представленное Сендайской рамочной программой, – это новое понимание риска, основанное не только на записях прошедших событий, но и на более точных прогнозах, которые отражают развивающиеся тенденции и динамику во времени и пространстве [47].

В проекте MATRIX¹⁴ предлагается три различных метода для описания и количественной оценки взаимодействий опасных явлений: дерево событий, байесовские сети и моделирование методом Монте-Карло с пошаговым временным шагом. Более того, отдельные риски в рамках оценки множественных рисков вычисляются с использованием общей единицы измерения (потеря жизней, экономические потери) (например, [4, 48]). Это позволяет проводить прямое сравнение и агрегирование различных видов рисков. В результате применения обоих подходов выделяют области, подверженные различным общим классам риска (например, [45, 49]). Пространственно-ориентированные карты могут использоваться различными конечными пользователями для получения конкретной информации о количественных показателях риска.

Для оценки риска возникновения мультиопасных природных явлений применяется метод *Multi-Hazard Risk Assessment (MHRA)*. Основным его преимуществом является то, что он объединяет различные типы опасностей в единую систему¹⁵ для совместной оценки (см. работу¹⁶ и [46]), учитывает параметры каждой природной опасности (вероятность, частота и величина), их взаимодействие и взаимосвязи (например, одна опасность может повторяться все время; разные опасности могут возникать независимо друг от друга или последовательно в одном и том же месте) [5].

Природоориентированные решения для снижения рисков концептуализированы совсем недавно¹⁷, но при этом показали многообещающие результаты

¹⁴ Garcia-Aristizabal A., Marzocchi W. Dictionary of the terminology adopted. Deliverable 3.2. MATRIX project (Contract n 265138). 2012. URL: https://www.researchgate.net/profile/Alexander-Garcia-10/publication/255989333_Assessing_cascading_effects_in_multi-hazard_and_multi-risk_analyses_Examples_from_Naples_Italy/links/5a152ed0aca27273c9eb20c4/Assessing-cascading-effects-in-multi-hazard-and-multi-risk-analyses-Examples-from-Naples-Italy.pdf (date of access: 12.07.2022).

¹⁵ Armonia – Applied Multi-Risk Mapping of Natural Hazards for Impact Assessment. Available at: <http://www.armoniaproject.net/> (date of access: 12.12.2020); Delmonaco G., Margottini C., Spizzichino D. Report on new methodology for multi-risk assessment and the harmonisation of different natural risk maps. (Del. 3.1). Rome, 2006. 85 p. URL: https://www.researchgate.net/publication/317957266_New_methodology_for_multi-risk_assessment_and_the_harmonisation_of_different_natural_risk_maps (date of access: 12.07.2022).

¹⁶ Principles of multi-risk assessment: interactions amongst natural and man-induced risks / W. Marzocchi [et al.]. Luxembourg : Office for Official Publications of the European Communities, 2009. 72 p.

¹⁷ Biodiversity, climate change, and adaptation: nature-based solutions from the World Bank portfolio. Washington, DC : The World Bank, 2008. 112 p. URL: <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/6216> (date of access: 14.07.2022); Rizvi A. R. Nature based solutions for human resilience: a mapping analysis of IUCN's ecosystem based adaptation projects. Gland, Switzerland : IUCN, 2014. 50 p.

в деле уменьшения угроз и сохранения биоразнообразия¹⁸. Однако такие подходы необходимо утвердить в качестве рекомендуемых мер по снижению риска.

Природоориентированные решения рассматриваются в качестве зонтичной концепции, которая включает в себя различные экосистемные подходы¹⁶, такие как экосистемная адаптация (*Ecosystem-based Adaptation*, сокр. *EbA*), экосистемное снижение риска бедствий (*Ecosystem based Disaster Risk Reduction*, сокр. *Eco-DRR*), развитие зеленой инфраструктуры, используемой для решения проблемы экологической деградации, снижения рисков возникновения стихийных бедствий и адаптации к изменению климата [50].

Общие принципы природоориентированных решений заключаются в обеспечении баланса между сохранением экосистемы и социально-экономическими выгодами на справедливой равноправной основе при широком участии общества. ОПЯ, риски их возникновения и адаптация к климатическим изменениям являются центральными для таких экосистемно-ориентированных подходов, как экосистемный подход к снижению риска бедствий (*Eco-DRR*), экосистемный подход к адаптации (*EbA*), зеленая инфраструктура (*Green Infrastructure*) и природная инфраструктура (*Nature Infrastructure*) [50]. Конкретные результаты реализации отдельных элементов природоориентированных решений для снижения уязвимости социально-экологических систем перед стихийными бедствиями пока не зафиксированы.

Одновременно с разработкой Международным союзом охраны природы (МСОП) принципов природоориентированных решений Всемирный банк предложил комплексные руководящие принципы по внедрению этих решений для снижения риска наводнений [51]. В этом руководстве предлагается в качестве одного из пяти всеобъемлющих принципов до принятия окончательного решения о подходах к снижению рисков проводить оценку рисков наводнений и преимуществ полного набора решений, не ограничиваясь только экологическими решениями. Наконец, в 2019 г. была опубликована Конвенция о биологическом разнообразии (*CBD*), содержащая добровольные руководящие принципы экосистемных подходов к адаптации к изменению климата и снижению риска бедствий. Все эти частично совпадающие, а иногда и взаимодополняющие наборы принципов и руководящих указаний имеют отношение к принятию природообоснованных решений в глобальном масштабе, поскольку они устраняют пробелы в знаниях и обеспечивают четкое руководство для лиц, принимающих решения по планированию и реализации природосберегающих технологий в контексте изменения климата, а также снижению риска возникновения ОПЯ [50].

Системы поддержки принятия решений (СППР) на основе моделей широко используются для поддержки управления окружающей средой в экологической, социальной и экономической сферах. Например, СППР были разработаны для устойчивого управления рыболовством [51]; сельским хозяйством и другими агросистемами [52]; управления средой обитания и экосистемами [53, 54]; освоения земель [52, 55]; планирования деятельности сообщества [14,

¹⁸ Nature-based solutions to address global societal challenges / Eds. E. Cohen-Shacham [et al.]. Gland, Switzerland : IUCN, 2016. 97 p. <https://doi.org/10.2305/IUCN.CH.2016.13.en>
382

56, 57]; управления водными ресурсами с учетом рек, озер, водно-болотных угодий, водохранилищ и их водосборных бассейнов [58, 59] и управления загрязнениями [12, 60].

Преимущество применения СППР для решения задач заключается в том, что с их помощью можно:

1) сосредоточить внимание на долгосрочных и стратегических вопросах [61];

2) учитывать групповое взаимодействие [62];

3) содействовать эффективному принятию решений в сложных, плохо структурированных задачах, которые имеют множество действующих лиц, факторов и взаимосвязей и характеризуются высокой неопределенностью и противоречивыми интересами участников [63];

4) включить интуитивно понятные интерфейсы, обеспечивающие взаимодействие между конечными пользователями и программным обеспечением [64];

5) интегрировать междисциплинарные данные и знания о процессе [52];

6) работать в различных временных и пространственных масштабах [52, 64];

7) адекватно оценивать динамику внутри системы, включая обратные связи [52];

8) использовать при построении гибкие и модульные программы, которые можно эффективно поддерживать, расширять и адаптировать к аналогичным тематическим исследованиям [65].

Заключение

При решении задач прогнозирования опасных гидрометеорологических явлений и предотвращения их возникновения необходимо опираться на опыт уже произошедших событий – анализ баз данных, публикации документов государственных организаций, страховых компаний и частных архивов (дореволюционные наблюдения). Первостепенное значение имеют натурные наблюдения, разработка сети станций с широким пространственным охватом, еще большее развитие судовых наблюдений и регулярный дистанционный мониторинг ключевых переменных или индикаторов природных опасностей. Это позволит получать оперативные сведения, проводить фундаментальные исследования физических механизмов стихийных бедствий и использовать эти данные для верификации и ассимиляции численных моделей.

На страновом уровне необходима разработка комплексной системы моделирования для учета сложных процессов взаимодействия, например взаимодействия атмосферы и океана, волн и течений, гидродинамического и морфодинамического взаимодействия, а также применение методики вложенных моделей для крупномасштабных исследований динамики процессов.

Отдельно необходимо учитывать особенности стихийных бедствий, происходящих в северных районах нашей страны, для которых характерны зачастую экстремальные фоновые показатели погодных условий, труднодоступность и удаленность, отсутствие необходимой инфраструктуры для спасения

людей и ликвидации последствий. Методы, применяемые при управлении рисками возникновения стихийных бедствий, не являются универсальными, поэтому знания и опыт, накопленные в результате возникновения ОПЯ в более теплых районах, нельзя слепо переносить на стихийные бедствия, произошедшие в холодных условиях.

Мы полагаем, что в ближайшие 50 лет при активном развитии синергии в науке, внедрении квантовых вычислений и удешевлении космических наблюдений достоверность прогнозирования ОГЯ и их ансамблей улучшится, а сроки предсказаний увеличатся.

При этом нельзя недооценивать важность работ по исследованию фундаментальных климатических процессов и явлений. Для этого необходима подготовка квалифицированных специалистов по соответствующим специальностям с классическими фундаментальными знаниями метеорологии, гидрологии, океанологии, биологии, физике, математике.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Natural disaster hotspots: A global risk analysis / M. Dille [et al.]. Washington, DC : World Bank, 2005. 132 p. URL: <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/7376> (date of access: 19.04.2022).
2. A review of multi-risk methodologies for natural hazards: Consequences and challenges for a climate change impact assessment / V. Gallina [et al.] // *Journal of Environmental Management*. 2016. Vol. 168. P. 123–132. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.11.011>
3. Curt C. Multirisk: What trends in recent works? – A bibliometric analysis // *Science of The Total Environment*. 2021. Vol. 763. 142951. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142951>
4. Multi-hazard risk assessment using GIS in urban areas: a case study for the city of Turrialba, Costa Rica / C. J. van Westen [et al.] // *Proceedings of the regional workshop on Best Practices in Disaster Mitigation (Bali, Indonesia, 22–24 September, 2002)*. Bali, 2002. P. 120–136.
5. Basic principles of multi-risk assessment: a case study in Italy / W. Marzocchi [et al.] // *Natural Hazards*. 2012. Vol. 62, iss. 2. P. 551–573. <https://doi.org/10.1007/s11069-012-0092-x>
6. Swift: A GPU based coupled hydrodynamic/hydraulic framework for urban flood prediction / R. Cohen [et al.] // *Proceeding of the Eleventh International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries*. Melbourne, Australia : CSIRO, 2015. P. 1–6.
7. Recent development and application of a rapid flood spreading method / J. Lhomme [et al.] // *Flood Risk Management: Research and Practice*. London : Taylor & Francis Group, 2009. P. 15–24.
8. Role of earth observation data in disaster response and recovery: from science to capacity building / G. Schumann [et al.] // *Earth Science Satellite Applications*. Cham : Springer, 2016. P. 119–146. https://doi.org/10.1007/978-3-319-33438-7_5
9. Cloud Computing in natural hazard modeling systems: Current research trends and future directions / K. Ujjwal [et al.] // *International Journal of Disaster Risk Reduction*. 2019. Vol. 38. 101188. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2019.101188>
10. Schneider P. J., Schauer B. A. HAZUS—its development and its future // *Natural Hazards Review*. 2006. Vol. 7, iss. 2. P. 40–44. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1527-6988\(2006\)7:2\(40\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1527-6988(2006)7:2(40))
11. Pranantyo I. R., Fadmastuti M., Chandra F. InaSAFE applications in disaster preparedness // *AIP Conference Proceedings*. 2015. Vol. 1658, iss. 1. 060001. <https://doi.org/10.1063/1.4915053>
12. Newham L. T. H., Jakeman A. J., Letcher R. A. Stakeholder participation in modelling for integrated catchment assessment and management: An Australian case study // *International Journal of River Basin Management*. 2007. Vol. 5, iss. 2. P. 79–91. <https://doi.org/10.1080/15715124.2007.9635308>

13. Quantitative multi-risk analysis for natural hazards: a framework for multi-risk modelling / J. Schmidt [et al.] // *Natural Hazards*. 2011. Vol. 58, iss. 3. P. 1169–1192. <https://doi.org/10.1007/s11069-011-9721-z>
14. *Hagedorn R., Doblas-Reyes F. J., Palmer T. N.* The rationale behind the success of multi-model ensembles in seasonal forecasting – I. Basic concept // *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*. 2005. Vol. 57, iss. 3. P. 219–233. <https://doi.org/10.3402/tellusa.v57i3.14657>
15. Multi-criteria evaluation of CMIP5 GCMs for climate change impact analysis / A. Ahmadalipour [et al.] // *Theoretical and Applied Climatology*. 2017. Vol. 128, iss. 1–2. P. 71–87. <https://doi.org/10.1007/s00704-015-1695-4>
16. *Raju K. S., Kumar D. N.* Impact of climate change on water resources with modeling techniques and case studies. Singapore: Springer, 2018. 266 p. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-6110-3>
17. Impact of global climate change on stream low flows: A case study of the Great Miami River watershed, Ohio, USA / S. Shrestha [et al.] // *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2019. Vol. 12, no. 1. P. 84–95.
18. Impacts of climate change on runoffs in East Azerbaijan, Iran / M. Zarghami [et al.] // *Global and Planetary Change*. 2011. Vol. 78, iss. 3–4. P. 137–146. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2011.06.003>
19. Large-scale flood hazard assessment under climate change: A case study / A. Shadmehri Toosi [et al.] // *Ecological Engineering*. 2020. Vol. 147. 105765. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.105765>
20. Spatial cloud computing: how can the geospatial sciences use and help shape cloud computing? / C. Yang [et al.] // *International Journal of Digital Earth*. 2011. Vol. 4, iss. 4. P. 305–329. <https://doi.org/10.1080/17538947.2011.587547>
21. *Huang Q., Li J., Li Z.* A geospatial hybrid cloud platform based on multi-sourced computing and model resources for geosciences // *International Journal of Digital Earth*. 2018. Vol. 11, iss. 12. P. 1184–1204. <https://doi.org/10.1080/17538947.2017.1385652>
22. Emergency response in natural disaster management: Allocation and scheduling of rescue units / F. Wex [et al.] // *European Journal of Operational Research*. 2014. Vol. 235, iss. 3. P. 697–708. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.10.029>
23. *Van Westen C. J.* Remote sensing for natural disaster management // *International archives of photogrammetry and remote sensing*. 2000. Vol. 33, part B7. P. 1609–1617. URL: https://www.isprs.org/proceedings/xxxiii/congress/part7/1609_XXXIII-part7.pdf (date of access: 25.03.2022).
24. *Laituri M., Kodrich K.* On line disaster response community: People as sensors of high magnitude disasters using internet GIS // *Sensors*. 2008. Vol. 8, iss. 5. P. 3037–3055. <https://doi.org/10.3390/s8053037>
25. *Jeyaseelan A. T.* Droughts & floods assessment and monitoring using remote sensing and GIS // *Satellite Remote Sensing and GIS Applications in Agricultural Meteorology: Proceedings of the Training Workshop, 7–11 July, 2003, Dehra Dun, India*. Geneva: WMO, 2004. P. 291–313. URL: <http://www.wamis.org/agm/pubs/agm8/Paper-14.pdf> (date of access: 25.03.2022).
26. An analysis of geospatial technologies for risk and natural disaster management / L. A. Manfré [et al.] // *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2012. Vol. 1, no. 2. P. 166–185. <https://doi.org/10.3390/ijgi1020166>
27. *Montoya L.* Geo-data acquisition through mobile GIS and digital video: an urban disaster management perspective // *Environmental Modelling & Software*. 2003. Vol. 18, iss. 10. P. 869–876. [https://doi.org/10.1016/S1364-8152\(03\)00105-1](https://doi.org/10.1016/S1364-8152(03)00105-1)
28. *Cutter S. L.* GI science, disasters, and emergency management // *Transactions in GIS*. 2003. Vol. 7, iss. 4. P. 439–446. <https://doi.org/10.1111/1467-9671.00157>
29. Satellite image analysis for disaster and crisis-management support / S. Voigt [et al.] // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2007. Vol. 45, no. 6. P. 1520–1528. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2007.895830>

30. SparkCloud: a cloud-based elastic bushfire simulation service / S. Garg [et al.] // *Remote Sensing*. 2018. Vol. 10, iss. 1. P. 74. <https://doi.org/10.3390/rs10010074>
31. Building Model as a Service to support geosciences / Z. Li [et al.] // *Computers, Environment and Urban Systems*. 2017. Vol. 61, part B. P. 141–152. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2014.06.004>
32. Integrating CyberGIS gateway with Windows Azure: a case study on MODFLOW groundwater simulation / B. Behzad [et al.] // *Proceedings of the ACM SIGSPATIAL Second International Workshop on High Performance and Distributed Geographic Information Systems*. Chicago : Association for Computing Machinery, 2011. P. 26–29. doi:10.1145/2070770.2070774
33. Virtual Fire: A web-based GIS platform for forest fire control / K. Kalabokidis [et al.] // *Ecological Informatics*. 2013. Vol. 16. P. 62–69. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2013.04.007>
34. A secure big data stream analytics framework for disaster management on the cloud / D. Puthal [et al.] // 2016 IEEE 18th International Conference on High Performance Computing and Communications; IEEE 14th International Conference on Smart City; IEEE 2nd International Conference on Data Science and Systems (HPCC/SmartCity/DSS). IEEE, 2016. P. 1218–1225. <https://doi.org/10.1109/HPCC-SmartCity-DSS.2016.0170>
35. *Al-Fares M., Loukissas A., Vahdat A.* A scalable, commodity data center network architecture // *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*. 2008. Vol. 38, iss. 4. P. 63–74. <https://doi.org/10.1145/1402946.1402967>
36. *Rossi C., Heyi M. H., Scullino F.* A service oriented cloud-based architecture for mobile geolocated emergency services // *Concurrency and Computation: Practice and Experience*. 2017. Vol. 29, iss. 11. e4051. <https://doi.org/10.1002/cpe.4051>
37. Community-based cloud for emergency management / J. Li [et al.] // 2011 6th International Conference on System of Systems Engineering. IEEE, 2011. P. 55–60. <https://doi.org/10.1109/SYBOSE.2011.5966573>
38. Armageddon – a tool for seismic risk assessment illustrated with applications / O. Sedan [et al.] // *Journal of Earthquake Engineering*. 2013. Vol. 17, iss. 2. P. 253–281. <https://doi.org/10.1080/13632469.2012.726604>
39. Мезомасштабное моделирование экстремальных ветров над Охотским морем и островом Сахалин / А. В. Кислов [и др.] // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2018. Т. 54, № 4. С. 381–385. doi:10.1134/S0002351518040090
40. *Дианский Н. А., Панасенкова И. И., Фомин В. В.* Исследование отклика верхнего слоя Баренцева моря на прохождение интенсивного полярного циклона в начале января 1975 года // *Морской гидрофизический журнал*. 2019. Т. 35, № 6. С. 530–548. doi:10.22449/0233-7584-2019-6-530-548
41. Циркуляция воды северо-восточного побережья острова Сахалин при прохождении трех типов глубоких циклонов над Охотским морем / Н. А. Дианский [и др.] // *Метеорология и гидрология*. 2020. № 1. С. 45–58.
42. *Fleischhauer M.* Spatial relevance of natural and technological hazards // *Natural and technological hazards and risks affecting the spatial development of European regions*. Vammalan Kirjapaino Oy : Geological Survey of Finland, 2006. P. 7–16. (Geological Survey of Finland ; special paper 42).
43. *Wipulanusat W., Nakrod S., Prabnarong P.* Multi-hazard risk assessment using GIS and RS applications: a case study of Pak Phanang Basin // *Walailak Journal of Science and Technology*. 2009. Vol. 6, iss. 1. P. 109–125. doi:10.2004/wjst.v6i1.76
44. *O'Keefe P., Westgate K., Wisner B.* Taking the Naturalness out of Natural Disasters // *Nature*. 1976. Vol. 260. P. 566–567. <https://doi.org/10.1038/260566a0>
45. Community resilience as a metaphor, theory, set of capacities, and strategy for disaster readiness / F. H. Norris [et al.] // *American Journal of Community Psychology*. 2008. Vol. 41, iss. 1–2. P. 127–150. <https://doi.org/10.1007/s10464-007-9156-6>
46. A methodological approach for the definition of multi-risk maps at regional level: first application / A. Carpignano [et al.] // *Journal of Risk Research*. 2009. Vol. 12, iss. 3–4. P. 513–534. <https://doi.org/10.1080/13669870903050269>

47. *Zuccaro G., Leone M. F., Martucci C.* Future research and innovation priorities in the field of natural hazards, disaster risk reduction, disaster risk management and climate change adaptation: a shared vision from the ESPRESSO project // *International Journal of Disaster Risk Reduction*. 2020. Vol. 51. 101783. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2020.101783>
48. *Loat R.* Risk management of natural hazards in Switzerland. Bern, 2010. 15 p. URL: https://www.sistemaprotezionecivile.it/allegati/1149_Svizzera_Risk_Management.pdf (date of access: 01.05.2022).
49. *Bell R., Glade T.* Multi-hazard analysis in natural risk assessments // *Risk Analysis IV / Edited by C. A. Brebbia*. WIT Press, 2004. P. 197–206. (WIT Transactions on Ecology and the Environment ; vol. 77). URL: <https://www.witpress.com/elibrary/wit-transactions-on-ecology-and-the-environment/77/14298> (date of access: 19.04.2022). doi:10.2495/RISK040181
50. A review of hydro-meteorological hazard, vulnerability, and risk assessment frameworks and indicators in the context of nature-based solutions / M. A. R. Shah [et al.] // *International Journal of Disaster Risk Reduction*. 2020. Vol. 50. 101728. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2020.101728>
51. *Carrick N. A., Ostendorf B.* Development of a spatial Decision Support System (DSS) for the Spencer Gulf penaeid prawn fishery, South Australia // *Environmental Modelling & Software*. 2007. Vol. 22, iss. 2. P. 137–148. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2005.07.025>
52. Integrated assessment of agricultural policies with dynamic land use change modelling / H. van Delden [et al.] // *Ecological Modelling*. 2010. Vol. 221, iss. 18. P. 2153–2166. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2010.03.023>
53. A decision support system for environmental effects monitoring / W. G. Booty [et al.] // *Environmental Modelling & Software*. 2009. Vol. 24, iss. 8. P. 889–900. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2009.02.001>
54. The WILDSPACE™ decision support system / I. W. Wong [et al.] // *Environmental Modelling & Software*. 2003. Vol. 18, iss. 6. P. 521–530. [https://doi.org/10.1016/S1364-8152\(03\)00027-6](https://doi.org/10.1016/S1364-8152(03)00027-6)
55. Simulating urban development scenarios for Wuhan / Y. Shi [et al.] // 2012 6th International Association for China Planning Conference (IACP). IEEE, 2012. P. 1–13. <https://doi.org/10.1109/IACP.2012.6342974>
56. Моделирование штормового волнения в Баренцевом море / С. А. Мысленков [и др.] // *Вестник Московского университета. Серия 5. География*. 2015. № 6. С. 65–75. URL: https://vestnik5.geogr.msu.ru/jour/article/view/195?locale=ru_RU (дата обращения: 12.12.2020).
57. *Nafziger J., She Y., Hicks F.* Dynamic river ice processes in a river delta network // *Cold Regions Science and Technology*. 2019. Vol. 158. P. 275–287. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2018.09.005>
58. Decision support system development for integrated management of European coastal lagoons / M. Casini [et al.] // *Environmental Modelling & Software*. 2015. Vol. 64. P. 47–57. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.11.008>
59. *Mysiak J., Giupponi C., Rosato P.* Towards the development of a decision support system for water resource management // *Environmental Modelling & Software*. 2005. Vol. 20, iss. 2. P. 203–214. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2003.12.019>
60. Decision support systems for risk-based management of contaminated sites / A. Marcomini, G. W. Suter II, A. Critto (eds.). New York : Springer, 2008. 436 p. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-09722-0>
61. *Коронкевич Н. И., Барabanова Е. А., Зайцева И. С.* Наиболее опасные проявления экстремальных гидрологических ситуаций на территории России // *Известия РАН. Серия географическая*. 2010. № 6. С. 40–47.
62. *Geertman S., Stillwell J.* Planning support systems: an introduction // *Planning support systems in practice / S. Geertman, J. Stillwell (eds.)*. Berlin ; Heidelberg : Springer, 2003. P. 3–22. https://doi.org/10.1007/978-3-540-24795-1_1

63. *McIntosh B. S., Seaton R. A. F., Jeffrey P.* Tools to think with? Towards understanding the use of computer-based support tools in policy relevant research // *Environmental Modelling & Software*. 2007. Vol. 22, iss. 5. P. 640–648. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2005.12.015>
64. How can we make progress with decision support systems in landscape and river basin management? Lessons learned from a comparative analysis of four different decision support systems / *M. Volk [et al.]* // *Environmental Management*. 2010. Vol. 46, iss. 6. P. 834–849. <https://doi.org/10.1007/s00267-009-9417-2>
65. *Argent R. M.* An overview of model integration for environmental applications—components, frameworks and semantics // *Environmental Modelling & Software*. 2004. Vol. 19, iss. 3. P. 219–234. [https://doi.org/10.1016/S1364-8152\(03\)00150-6](https://doi.org/10.1016/S1364-8152(03)00150-6)

Сведения об авторах:

Яицкая Наталья Александровна, заместитель директора по науке, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Федеральный исследовательский центр «Субтропический научный центр Российской академии наук» (354002, Сочи, ул. Яна Фабрициуса, д. 2/28); ведущий научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук» (344006, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41), кандидат географических наук, **ORCID ID: 0000-0002-4931-484X**, **ResearcherID: I-3169-2013**, **Scopus Author ID: 55349362100**, **SPIN-код: 1339-1317** **AuthorID: 637712**, yaitskayan@gmail.com

Магаева Анастасия Алексеевна, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук» (344006, Ростов-на-Дону, пр. Чехова, д. 41), **ORCID ID: 0000-0002-3519-3565**, **ResearcherID: AAG-1117-2021**, **Scopus Author ID: 14629086400**, **SPIN-код: 6735-9326** **AuthorID: 847661**, a.magaeva@mail.ru