

© 2024 г. Е.Д. ВЯЗИЛОВ, д-р техн. наук (vjaz@meteo.ru),
Д.А. МЕЛЬНИКОВ (melnikov@meteo.ru)
(Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической
информации – Мировой центр данных, Обнинск),
О.А. МИНКОВ (oaminkov@gmail.com)
(Обнинский институт атомной энергетики – филиал Национального
исследовательского ядерного университета «МИФИ»)

ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ДАННЫХ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ В МОДЕЛЯХ, СВЯЗАННЫХ С УЧЕТОМ ВОЗДЕЙСТВИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ НА ПРЕДПРИЯТИЯ

Цифровые двойники объектов отражают состояние окружающей среды и деятельность предприятий, на которые воздействует среда. Предлагается использовать модели для расчета показателей оценки воздействия опасных природных явлений или изменений климата; прогноза этих воздействий; оценки убытков; расчета стоимости мероприятий по защите предприятий; оценки целесообразности проведения превентивных мероприятий с целью их оптимизации. Приведены требования к моделям оценки воздействий, работающим с цифровым двойником. Представлены трудности при использовании таких моделей. Рассматриваются предложения по разработке отдельных моделей воздействий. Показана схема использования цифровых двойников при моделировании воздействий окружающей среды на предприятия.

Ключевые слова: цифровой двойник, модели оценки воздействий, окружающая среда.

DOI: 10.31857/S0005231024030059, EDN: TUQHNLТ

1. Введение

Глобальные проблемы изменения климата нарастают, условия ведения бизнеса становятся трудными из-за усложнения самих предприятий и растущей зависимости от складывающихся гидрометеорологических условий (ГМУ). Информация о состоянии окружающей среды используется для решения бизнес-процессов, зависящих от ГМУ. При огромном объеме гидрометеорологических данных руководителям предприятий сложно понять, какие категории наблюдаемых, прогнозных или климатических данных следует использовать в бизнес-процессах. Одновременно с гидрометеорологическими данными [1] в некоторых моделях используются экономические, финансовые, технические, социальные и другие сведения о предприятии. Модели прогноза воздействий опираются на интегрированные данные, полученные из различных доменов. Существующие системы интеграции усваивают данные, которые поставщики данных предоставляют в общее пользование.

Это приводит к фрагментарному предоставлению данных. Автоматизация использования гидрометеорологических данных достигла такого уровня, что сразу после измерения значений параметров о состоянии ГМУ получают комплексные показатели состояния погоды — комфортность, суровость, уровень опасности и др. В строительстве используются строительные нормы и правила [2], пособия типа [3], в которых отражены эмпирические модели, позволяющие рассчитывать снеговые и гололедные нагрузки на кровли домов, определять инженерную защиту территории от затопления. Для экономической оценки адаптации отраслей к изменениям климата разработаны простые программные средства [4]. Развиваются цифровые двойники (ЦД), в том числе и в области окружающей среды [1, 5, 6]. ЦД — это база данных нового типа, предоставляющая данные в стандартизированной структуре для выявления опасных явлений (ОЯ), “моделирования и прогнозирования воздействий ОЯ на” [7] предприятия, оценки ущерба и стоимости превентивных мероприятий, оптимизации и принятия решений [1, 8]. На основе ЦД появляется возможность моделировать условия эксплуатации и предсказать состояние предприятий и бизнес-процессов при воздействии ОЯ. Потенциал ЦД заключается в способности доставлять данные моделям в составе атрибутов, которые необходимы для решения конкретных бизнес-процессов. Целью исследования является определение предварительного состава моделей для оценки воздействий окружающей среды на предприятия, которые используются для повышения эффективности гидрометеорологического обеспечения предприятий с использованием ЦД объектов.

2. Схема использования цифровых двойников при моделировании

Направлениями использования ЦД в области учета ГМУ являются [6]:

1. Моделирование развития новых промышленных районов. При развитии новых промышленных районов, постройке, строительстве и эксплуатации предприятий ЦД позволяет оценить сценарии расположения предприятий с учетом климатических условий, транспортных возможностей и экономических выгод. Это позволяет выбрать сценарий развития промышленных районов с учетом экологической, гидрометеорологической и транспортной безопасности.

2. Расположение предприятий внутри промышленного района и планирование доставки сырья и материалов между ними. С помощью ЦД моделируются логистические операции, которые позволяют повысить скорость доставки материалов и сырья, оптимизировать бизнес-процессы предприятия (например, повысить безопасность доставки грузов и материалов).

3. Аналитика и оптимизация решений. На основе ЦД получается расширенная аналитика и оптимизируются решения за счет выявления аномалий, превышений пороговых значений, расчета тенденций и других показателей состояния ГМУ для выдачи прогноза воздействий и рекомендаций.

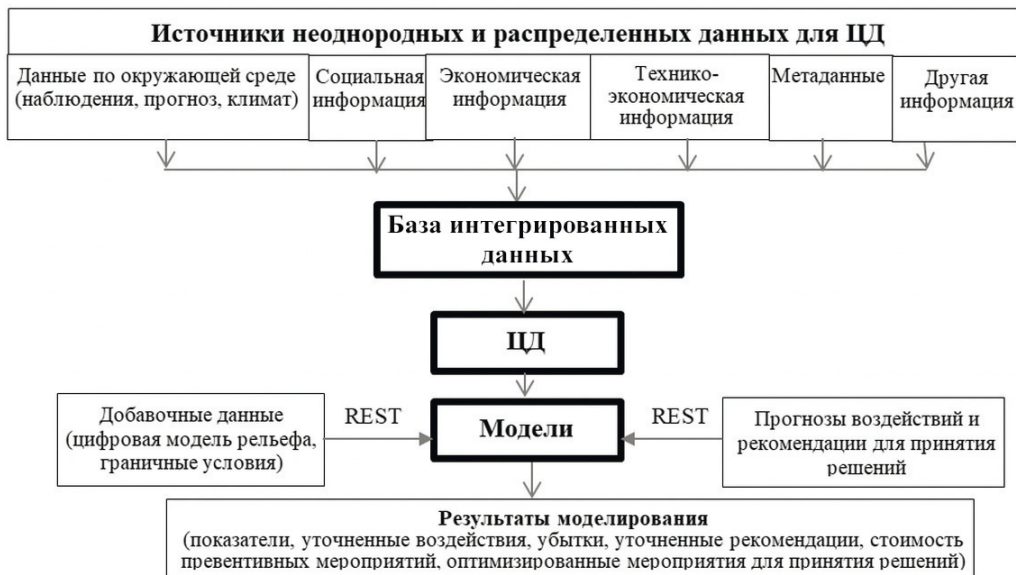


Рис. 1. Схема использования ЦД при моделировании.

4. Управление рисками. ЦД используется для учета уровня опасности ситуаций, связанных с влиянием ГМУ, например на работу транспорта, перевозимые грузы, операции погрузки–разгрузки. Вероятность влияния на эту деятельность отдельных явлений и вероятность убытков от них известна.

Схема использования ЦД при моделировании воздействия ОЯ представлена на рис. 1. ЦД здесь рассматривается как цифровое представление свойств окружающей среды и сопутствующих данных, связанных с социальными, экономическими, технологическими ситуациями, складывающимися на предприятиях. Для интеграции данных в Росгидромете используется Единая государственная система информации об обстановке в Мировом океане (ЕСИМО) [9]. Информационные ресурсы в этой системе хранятся в унифицированном виде и предназначены для применения в режиме самообслуживания на портале по адресу <http://esimo.ru>. Данные, не интегрированные в ЕСИМО, доставляются до ЦД с помощью REST-сервисов. ЦД отражает как данные по окружающей среде, так и другим сферам и используется при моделировании воздействий окружающей среды.

Сложные модели, например расчетно-модельный комплекс моделирования разливов нефти, включенный в ЕСИМО, работают на удаленном сервере, и для него регулярно готовятся и доставляются интегрированные данные на этот сервер, где автоматически запускается модель [9, 10]. Пользователь, зная место, время разлива и объем разлитой нефти, запускает модель. Результаты моделирования передаются на портал и там визуализируются как анимация пятна распространения нефти на карте. Пользователь проводит анализ на предмет, куда движется разлив и когда достигнет побережья.

ЦД используется для:

- выявления ОЯ для конкретных предприятий на основе локальных пороговых значений показателей состояния ГМУ;
- получения данных по составу только тех, которые нужны предприятию;
- использования не только данных о состоянии окружающей среды, но и «прогноза возможных воздействий ОЯ на деятельность предприятия, оценки ущерба, расчетов стоимости превентивных мероприятий» [5];
- моделирования воздействий ОЯ на бизнес-процессы предприятий;
- повышения осведомленности руководителей о складывающихся ГМУ, воздействиях ОЯ на предприятия и возможных ущербах.

С помощью ЦД проводится анализ воздействий ОЯ и моделирование ситуаций на цифровой модели объекта, при которых происходят разрушения кровли крыш, аварии, порча продукции и т.п. Выполненное с помощью ЦД моделирование воздействий ОЯ на предприятия позволяет увидеть на цифровой модели новые опасные места или недостаточную ветроустойчивость объекта.

Пути, методы и средства для инженерных изысканий в области гидрометеорологии, включающие модели по расчету показателей состояния гидрометеорологической обстановки, оценке уровня опасности ОЯ и моделированию воздействий окружающей среды на морскую деятельность, отражены в пособии [3]. Далее кратко рассмотрим модели, которые используют данные из ЦД.

3. Описание моделей

3.1. Модели прогноза погоды

Модели прогноза погоды (температуры воздуха, влажности, ветра, атмосферного давления по пространству с различными пространственно-временными масштабами разрешения) применяются в России и других странах [11, 12]. Эти модели на основе данных наблюдений, используя классические уравнения динамики и термодинамики атмосферы, интерполируют значения параметров в узлы регулярной сетки. Результаты работы этих моделей представляют объекты ЦД для обслуживания потребителей, выявления ОЯ и прогноза воздействий этих явлений на население и предприятия. Полученные поля распределения наблюдаемых, расчетных и прогностических параметров используются для прогноза гидрологических, морских и других явлений, переноса загрязняющих веществ. Например, рассчитывается прогноз направления и высоты волн или течений на основе ветра. На основе метеопрогнозов вычисляется распространение вулканического пепла после извержения вулкана [13, 14].

Сегодня потребители используют информационную продукцию, полученную на основе моделей анализа и прогноза. Продукция включает карты пространственного распределения отдельных параметров; таблицы с цифровыми

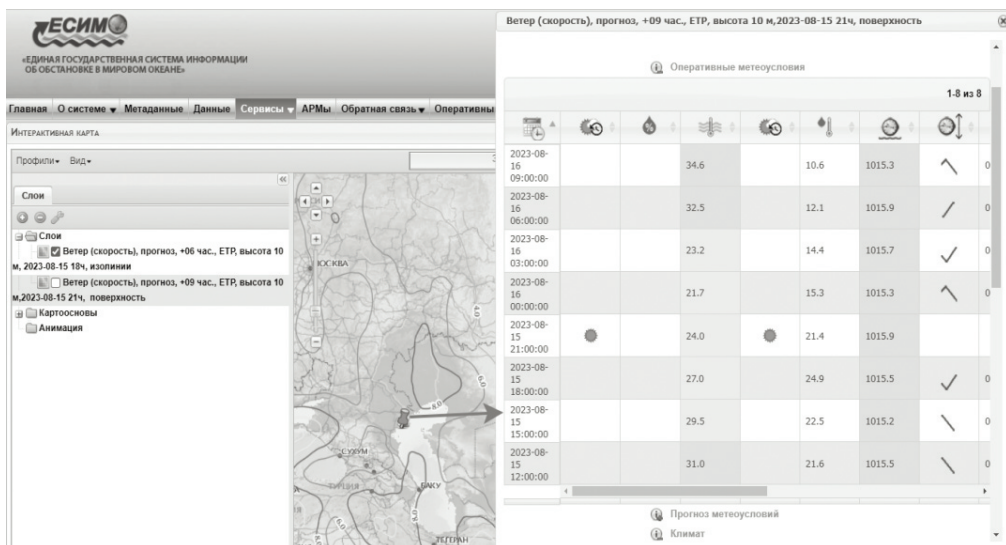


Рис. 2. Результаты оценки уровня опасности для точки на карте.

данными; графики временного хода; описания сложившихся ГМУ, подготовленных на основе наблюдаемых данных. Детально ознакомиться с информационной продукцией в форме результатов визуализации анализов и прогнозов можно на сайте Гидрометцентра России (<https://meteoinfo.ru/>).

3.2. Вычисление показателей оценки воздействий опасных явлений

Для некоторых явлений вместо превышений пороговых значений в наблюдаемых данных лучше использовать комплексные показатели — индекс суровости и комфортность погоды, показатель пожарной опасности, характеристики устойчивости предприятий к внешним воздействиям ОЯ (влаго-, морозо-, засухо-, ветро-, волноустойчивость). Эти показатели вычисляются по наблюдаемым и прогностическим значениям параметров на основе физических или эмпирических моделей. Результаты оценки уровня опасности отдельных показателей и предоставления наблюдаемых, прогностических и климатических данных в одном интерфейсе для выделенной точки на карте представлены на рис. 2. Исследования по расчету показателя комфортности климата и погоды представлены в серии докладов на конференции [15, 16].

3.3. Прогноз интенсивности воздействий

Модели оценки воздействий условий среды на предприятия индивидуальны и разрабатываются по заказу, например при строительстве гидротехнических сооружений, которые являются защитными сооружениями от наводнений, селей и т.п. Такие модели используются также при проектировании крупных предприятий и позволяют оценить возможные воздействия с учетом характеристик этих объектов.

Эмпирические модели основаны на связи между количественными значениями показателей изменения климата и результатами конкретных экономических процессов. При расчете высоты волнолома используется правило: чем выше поднимется уровень мирового океана, тем выше должна быть высота дамбы. Надо найти компромисс между стоимостью строительства дамбы и суммарной ежегодной стоимостью ремонта. Много моделей связано с предсказанием урожайности зерновых и доставкой товаров в торговую сеть при учете изменений потребностей населения в товарах в зависимости от погоды [17, 18]. Другими примерами моделей являются:

- оптимизация расположения предприятий и транспортных путей, чтобы не заметало снегом, с учетом розы ветров, характеристик рельефа местности;
- выбор параметров ледозащитных сооружений для объектов на берегу;
- оптимизация процессов складирования грузов в порту в зависимости от условий хранения грузов, подверженных воздействию влажности, низких или высоких температур;
- повышение эффективности работы коммунальных служб: оптимизация отопления с учетом температуры воздуха на улице, розы ветров, других характеристик.

3.4. Оценка возможного ущерба

Авария танкера приводит к экологической катастрофе. Список ущербов, вызванных разливом нефти, и затрат на ликвидацию последствий включает [19]: стоимость операций по очистке воды и побережья от нефти; выплаты страховки за ущерб. Возникает ущерб от уменьшения уловов рыбы, утраты груза с нефтью у собственника груза, загрязнения пляжей, гибели биоты.

В МЧС России используются модели расчета [20] возможных разрушений, числа погибших и раненных при землетрясениях; подъема воды по цифровой модели рельефа для вычисления продолжительности эвакуации; зон распространения низового пожара с использованием направления и скорости ветра, влажности; времени остывания помещений до минусовых значений внутри помещения в зависимости от температуры воздуха.

Программа «Расчет вероятного количества погибших и спасенных пострадавших с комбинированными повреждениями в морских катастрофах» позволяет «на основе информации о количестве пассажиров на судне, времени начала спасательной операции, температуры морской воды, удаленности от берега рассчитать количество погибших в катастрофе и структуру пострадавших». [21].

Материальный ущерб, связанный с ОЯ, включает потери от простоя предприятия; стоимость неполученной продукции, ремонта испорченного оборудования, механизмов; ремонта зданий. Ущерб от прохождения судами сложных ледовых условий рассматривается в следующих вариантах: ледокольная проводка — ущерб связан с опозданием доставки груза, стоимостью проводки судна ледоколом; ожидание благоприятных ледовых условий — ущерб определяется простоем судов; прохождение судна в сложных условиях без ледоко-

ла, возможные варианты — гибель или авария судна. При гибели судна ущерб включает стоимость судна, груза и судового имущества; ущерб здоровью людей, включая их возможную гибель; выплаты за моральный ущерб. При аварии ущерб включает потери прибыли за время аварии и ремонта; стоимость ремонта, буксировки аварийного судна, вознаграждение за спасение; штраф, неустойку, неуплату фрахта в связи с опозданием доставки груза.

3.5. Расчет стоимости проведения превентивных мероприятий

«Для принятия решения, кроме возможного ущерба, необходимо знать стоимость превентивных мероприятий» [22]. До явления укрываются грузы, боящиеся влаги, эвакуируются ценные грузы в безопасное место и т.д. Большинство расчетов стоимости превентивных мероприятий складывается из [23] заработной платы, участвующих в превентивных мероприятиях, стоимости арендованной техники, дополнительного оборудования для усиления мер безопасности, заблаговременного строительства защитных сооружений, расходных материалов; затрат на эвакуацию людей и т.п. [7]. Единовременные затраты производятся для конкретного предприятия один раз, например строительство дамбы, предотвращающей наводнение, или волнолома, препятствующего прохождению волн в бухту, где находится порт. Постоянные затраты относятся к единице времени год — ежегодная подготовка жилищно-коммунального хозяйства к зимнему сезону; эксплуатация защитных сооружений.

3.6. Оптимизация проведения превентивных мероприятий

Модели оптимизации применяются в случае выдачи рекомендаций по проектам превентивных мероприятий, требующих больших материальных затрат на выполнение и расчета времени на эвакуацию людей и имущества. Предложенные системой поддержки решений рекомендации уточняются с помощью математических моделей [24]. Демонстрационный вариант модели расчета стоимости превентивных мероприятий и оценки ущерба [7] реализован в виде мобильного приложения, рис. 3. Приложение позволяет руководителю решить, проводить или не проводить превентивные мероприятия.

«Оптимальное решение — это хозяйственное решение потребителя, принимаемое на основании информации о состоянии окружающей среды и обеспечивающее получение максимального экономического эффекта или минимального ущерба, или обеспечение безопасности работ, людей, предприятий. В качестве критериев оптимальности выступают средние потери, минимальная вероятность потерь, превышающая некоторый заданный уровень максимально возможного ущерба, средний выигрыш, минимум и др.» [24].

Для некоторых ОЯ (сели, цунами, смерчи) «методы прогноза не всегда дают точные результаты, и руководитель оказывается перед дилеммой: применять или не применять защитные мероприятия при прогнозе возникновения ОЯ. У него имеется три стратегии: никогда не применять защитные ме-

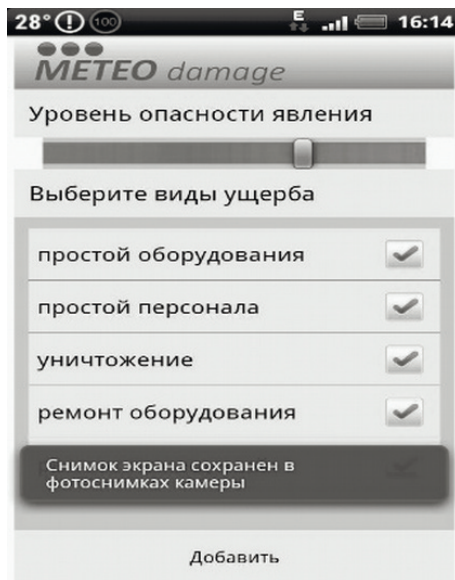


Рис. 3. Схема использования ЦД при моделировании.

роприятия; всегда применять защитные мероприятия; применять защитные мероприятия выборочно, ориентируясь на интуицию или дополнительную информацию» [7]. Использование экономических моделей позволяет иметь аргументированное решение по проведению тех или иных мероприятий.

Оценка ущерба носит вероятностный характер. При выработке решения руководитель не знает, какие значения будут принимать влияющие на ущерб показатели ОЯ в каждый момент времени, и рассматривает только распределение вероятностей этих значений. Поэтому потери потребителя тоже носят вероятностный характер. Чтобы выбрать то или иное решение в качестве экономически оптимального, определяется сначала закон распределения потерь, который используется в качестве критерия оптимального решения. С этой целью применяются средние в статистическом смысле потери. Этот метод минимизирует потери, ожидаемые в среднем за бесконечно долгое время, и никак не ограничивает вероятность ущерба.

Целесообразно найти оптимальную хозяйственную стратегию, придерживаясь которой, потребитель сводил бы риск к минимуму. Для отыскания такой стратегии применительно к каждой конкретной задаче строится модель, отражающая реакцию объекта на условия среды и позволяющая построить функцию полезности — зависимость затрат, ущерба, прибыли при ГМУ в виде матрицы с расчетом максимальных, минимальных и средних затрат. Критериями принятия решений при неопределенности являются критерии Лапласа, Сэвиджа, Гурвица [24]. Эти критерии используются для определения оптимального значения затрат для минимизации затрат на строительство дамбы и проведения превентивных мероприятий при нескольких значениях вероятностей наводнения [1].

Примеры других оптимизационных задач:

- оптимизация выделения складских помещений для грузов, боящихся воздействий окружающей среды (скоропортящиеся грузы, или грузы, боящиеся осадков, и др.);
- буксировка опасных, ценных или крупногабаритных грузов на большие расстояния;
- расчет прибыли порта при учете сроков вскрытия припая в арктических портах;
- рекомендованные курсы следования судов в зависимости от скорости ветра, высоты волн и ледовых условий.

4. Требования к моделям

4.1. Требования к математическим, экономическим и другим типам моделей, используемых для оценки воздействий окружающей среды на предприятия

Трудностями при использовании моделей являются [1]:

- дефицит открытых данных;
- незрелость и отсутствие междисциплинарного диалога при аналитике данных, полученных от поставщиков данных;
- необходимость расширения междисциплинарных исследований, посвященных моделированию воздействий окружающей среды на предприятия;
- большой объем данных, представляемых руководителям предприятий в виде карт, диаграмм, графиков, таблиц, что требует автоматизации аналитических функций;
- необходимость расширения интеграции разнородных и распределенных данных.

С учетом этих трудностей выработаны следующие требования к моделям. Модели готовы к повторному выполнению в любое время ($24 \times 7 \times 365$) и для них всегда готовы необходимые актуальные данные в виде ЦД. Модели работают в распределенной среде. Доставка данных до моделей происходит в форматах обмена JSON или XML с помощью REST-, веб- или API-сервисов. Модели прогноза автоматически запускаются в установленные регламентом сроки, связанные с поступлением новых порций данных. Модели оценки воздействий запускаются по событию в случае выявления ОЯ и возникновения опасности предприятию.

4.2. Требования к модели данных цифрового двойника

Использование ЦД в моделях требует использования универсальной модели данных [25]. Объектами такой модели являются реестры, справочники и перечисления. Реестры — представляет записи со значениями атрибутов и связи между записями, относящимися к одному объекту. Справочники — это классификаторы, используемые в реестрах. Перечисления — это список

множественных значений атрибутов. За счет перечислений в одном атрибуте хранится несколько значений одного свойства объекта. Для реализации модели данных применяются следующие принципы:

- ЦД состоит из двух типов данных (временные ряды, данные в узлах сетки);

- каждый тип данных включает несколько объектов, относящихся к различным предметным областям, данные которых объединяются в ЦД;

- объекты одного типа хранятся в одной модели данных;

- каждый экземпляр объекта ЦД имеет уникальный идентификатор;

- цифровые объекты имеют одинаковые поисковые атрибуты;

- множественные значения для каждого свойства объектов записываются в одном атрибуте в виде списка значений через разделитель;

- каждый цифровой объект имеет экземпляр метаданных, что облегчает их поиск;

- метаданные обновляются автоматически после поступления новой порции данных;

- данные для ЦД непрерывно загружаются, обрабатываются и доставляются потребителям на основе конвейера [10].

Временные ряды хранятся в виде двух таблиц — метаданные и данные. Метаданные отражают сведения о временных рядах — временное разрешение, координаты точки, название пункта, имя параметра, другие. Данные временного ряда представляются как множественные значения в виде списка для каждого параметра.

Данные в узлах регулярной сетки тоже состоят из двух сущностей — метаданные и данные. Метаданные включают сведения о свойствах сетки и каждого поля — координаты района, дата–время, шаг сетки, имя параметра и другие атрибуты метаданных. Данные в узлах сетки представляются в виде списка множественных значений атрибутов в узлах сетки — широта, долгота, время и значения параметров. Связи с другими объектами и классификаторами организуются в виде ссылок.

5. Заключение

Представлены подходы по использованию данных ЦД для оценки влияния окружающей среды на деятельность предприятия с помощью математических, экономических моделей для расчета показателей устойчивости предприятий к воздействиям среды, идентификации ОЯ, прогноза воздействий, оценки ущерба, расчета стоимости превентивных мероприятий и оптимизации решений. Предложена унифицированная модель данных ЦД для объекта, представленного в виде одной таблицы. Это позволяет иметь связи как между объектами, так и отдельными экземплярами свойств среды и предприятия.

ЦД отражает состояние окружающей среды и деятельность предприятий в четырехмерном пространстве — широта, долгота, высота, время в виде вре-

менных рядов и данных в узлах регулярной сетки. Получаемый цифровой аналог состояния окружающей среды в виде значений параметров среды и экономических показателей предприятий позволяет отслеживать показатели опасности окружающей среды для предприятий, моделировать и прогнозировать воздействия на деятельность предприятий. Модели, использующие данные ЦД, помогут руководителям получать сведения об ОЯ. Это позволит оптимизировать бизнес-процессы, сократить ущерб от воздействия ОЯ и изменений климата, повысить эффективность работы предприятия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Вязилов Е.Д.* Цифровая трансформация гидрометеорологического обеспечения потребителей. Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД. Т. 2. Направления использования. 2022. 356 с.
2. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов): СНИП 2.06.04-82. Госстрой СССР. М.: Стройиздат, 1986. 40 с.
3. Инженерно-гидрометеорологические изыскания на континентальном шельфе. М.: Гидрометеоздат, 1993. 377 с.
4. European Union's project ECONADAPT Toolbox provides easily accessible information on the economic assessment of adaptation. <https://econadapt-toolbox.eu/easy-access-guide>. Accessed: 8 February 2019.
5. *Вязилов Е.Д.* Цифровой двойник для окружающей среды // Сборник трудов Международной конференции "ENVIROMIS 2022" и школа молодых ученых по измерениям, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды. Томск: ИМКЭС СО РАН. 12–17 сентября 2022. С. 323–326.
6. *Viazilov E.D.* About Creating a Digital Twins in Field of Earth Sciences // Int. J. Appl. Sci. Development. 2022. V. 1. Art. 6. <https://doi.org/10.37394/232029.2022.1.6>. [https://wseas.com/journals/asd/2022/a12asd-006\(2022\).pdf](https://wseas.com/journals/asd/2022/a12asd-006(2022).pdf). Published: December 31, 2022. P. 42–51.
7. *Вязилов Е.Д.* Новые подходы по доведению информации об опасных гидрометеорологических явлениях и повышению информированности лиц, принимающих решения // Конференция «Проблемы прогнозирования чрезвычайных ситуаций». XVI Всероссийская научная конференция. Москва, 27–28 сентября 2017 г. Сборник материалов. М.: МЧС России, ФКУ «Антистихия». 2017. С. 40–44.
8. *Viazilov E.D.* From Informing Users about Disasters to Issuing a Forecast of Possible Impacts and Recommendations // J. Engineering World. 2022. No. 4. P. 34–43. <https://wseas.com/journals/ew/2022/a12engw-5115-806.pdf>
9. ЕСИМО. Единая государственная система информации об обстановке в Мировом океане. 2013. URL: <http://esimo.ru>. Доступ: 04.01.2023.
10. *Viazilov E.D., Melnikov D.A., Mikheev A.S.* On the development of a pipeline for processing hydrometeorological data // Supplementary Proceedings of the XXIII International Conference on Data Analytics and Management in Data Intensive Domains DAMDID/RCDL. 2021. V. 3036. <http://ceur-ws.org/Vol-3036/paper08.pdf>.

11. *Olchev A.V., Rozinkina I.A., Kuzmina E.V., Nikitin M.A., Rivin G.S.* Influence of forest cover changes on regional weather conditions: estimations using the mesoscale model COSMO // IOP Publishing Ltd. 2018. IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. V. 107, 012105. 7 p. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/107/1/012105>.
12. Динамика поля геофизического параметра атмосферы над акваториями Мирового океана: интегральное влагосодержание атмосферы (TPW), водозапас облаков (CLW) и скорость приповерхностного ветра (WND). Шаг по времени – 3 часа. Шаг сетки – 0,25°. <https://fireras.su/tpw/>. Доступ: 09.01.2024.
13. *Сорокин А.А., Королев С.П., Гирина О.А. и др.* Интегрированная программная платформа для комплексного анализа распространения пепловых шлейфов при эксплозивных извержениях вулканов Камчатки // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. В. 4. С. 9–19.
14. *Ермаков Д.М., Чернушич А.П., Шарков Е.А.* Геопортал спутникового радиотеплового излучения: данные, сервисы, перспективы развития // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. В. 3. С. 46–57.
15. *Коспанов А.А., Константинов П.И.* Сравнение влияния зеленых и белых крыш на городской остров тепла на примере трех волн жары в Москве // Международная молодежная школа и конференция по вычислительно-информационным технологиям для наук об окружающей среде. (CITES 2023). 13–23 июня 2023. М.: С. 68–69.
16. *Левищева Т.П., Константинов П.И.* Применение локальных метеорологических моделей для воспроизведения городского микроклимата на примере Москвы // Международная молодежная школа и конференция по вычислительно-информационным технологиям для наук об окружающей среде. (CITES 2023). 13–23 июня 2023. М.: С. 83.
17. Методика определения размера, вреда, который может быть причинен жизни, здоровью физических лиц, имуществу физических и юридических лиц в результате аварии судоходных гидротехнических сооружений. Утв. Приказом МЧС России и Минтранса России от 02.10.2007.
18. *Хандожко Л.А.* Экономическая метеорология. СПб.: Гидрометеиздат, 2005. 490 с.
19. *Ивченко А.А., Зацепя С.Н., Солбаков В.В. и др.* Модельный комплекс SPILLMOD-RA для расчета статистических характеристик распространения разливов нефти в море на основе тематического набора данных реанализа метеорологических полей // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Номер свидетельства: RU 2020665648. 2020. Номер заявки: 2020664664.
20. *Алабян А.М., Зеленцов В.А., Крыленко И.Н. и др.* Масштабируемая региональная система мониторинга и оперативного прогнозирования речных наводнений: результаты разработки и тестирования. М.: МЧС России, 2018. 11 с.
21. *Закревский Ю.Н.* Обоснование системы оказания медицинской помощи и лечения пострадавших в морских катастрофах // Автореф. дисс. ... д-ра мед. наук по специальности 05.26.02 – «Безопасность в чрезвычайных ситуациях». Архангельск: ГБОУ «Северный государственный медицинский университет», 2013. 40 с.
22. *Вязилов Е.Д., Чуряев Н.В.* О смене парадигмы гидрометеорологического обслуживания сведениями об опасных явлениях / Труды Гидрометцентра России,

2016. Вып. 362. Гидрометеорологические прогнозы. Под редакцией д-ра геогр. наук Е.С. Нестерова. С. 224–235.
23. *Чуняев Н.В.* Информационная поддержка управления морской деятельностью в случае опасных природных явлений. В сб.: Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. 2015. В. 578. С. 156–173.
24. *Мадера А.Г.* Математические модели и принятие решений в управлении: Руководство для топ-менеджеров. М.: УРСС, 2021. 684 с.
25. *Viazilov E.D., Puzova N.V., Mikheev A.S., Melnikov D.A.* Choosing a Data Model for the Environmental Digital Twin. Supplementary Proceedings of the XXIV International Conference on Data Analytics and Management in Data Intensive Domains (DAMDID/RCDL 2022) // Pleiades Publishing, Ltd. Special issue of the Lobachevskii Journal of Mathematics. 2023. V. 44. Is. 1. P. 237–248.
<https://doi.org/10.1134/S1995080223010444>

Статья представлена к публикации членом редколлегии А.А. Галяевым.

Поступила в редакцию 08.07.2023

После доработки 23.09.2023

Принята к публикации 20.01.2024