РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ИНДИКАТОРОВ СОСТОЯНИЯ ЭКОСИСТЕМЫ АЗОВСКОГО МОРЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ОПАСНЫХ ЯВЛЕНИЙ

В.В. Кулыгин

Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук, г. Ростов-на-Дону
kulygin@ssc-ras.ru

Аннотация. Активное освоение приморских территории, подверженных многим природным опасностям, и создание там объектов, обладающих высокой стоимостью, но уязвимых к природному риску, создают предпосылки для роста ущербов от опасных явлений. В связи с чем возрастает значимость планирования землепользования в береговой зоне, которое должно содержать механизмы предупреждения возникновения опасностей и снижения их последствий. Целью настоящего исследования является разработка системы индикаторов состояния экосистемы Азовского моря для оценки опасных явлений. В работе рассмотрены основные компоненты, участвующие в оценке риска опасного явления: опасность, подверженность, уязвимость. Охарактеризованы количественный и индексный подходы к оценке риска. Первый позволяет проводить сравнительный анализ «затраты-выгоды» мероприятий по снижению риска. Вторым подход менее требователен к данным и предусматривает работу с плохо формализуемыми факторами. В рамках индексного подхода разработана система индикаторов для представления исторических и ожидаемых изменений в экосистеме Азовского моря, состоящая из трех групп: индикаторы состояния, индикаторы нагрузки, индикаторы тенденций. В качестве модельной основы для расчета характеристик проявления опасных явлений в регионе Азовского моря выбрана система прогнозирования «EX-MARE».

Ключевые слова: опасные природные явления, система индикаторов, риски, Азовское море

В настоящее время накоплен значительный объем информации об опасных природных явлениях, их генезисе и закономерностях развития. Однако ущербы от катастрофических природных явлений продолжают расти. Это может быть связано не столько с ростом частоты и интенсивности опасностей, сколько с увеличением числа и стоимости материальных ценностей, а также повышением уязвимости общества.

Прибрежные территории густо заселены и чаще всего именно здесь располагается инфраструктура морского хозяйства. Поэтому одним из механизмов предупреждения возникновения опасных природных явлений (ОЯ) и снижения их последствий для морехозяйственных систем является планирование землепользования в береговой зоне.

Разработка методов планирования и управления природопользованием с целью минимизации последствий ОЯ для морехозяйственной деятельности и обеспечения устойчивого развития в силу своей сложности и междисциплинарности требует привлечения широкого спектра математических методов и моделей системного анализа.

В общем виде процедура стратегического планирования включает такие элементы как:

- определение экологического статуса прибрежных экосистем (формирование перечня индикаторов состояния, оценка текущих значений);
- описание видов хозяйственной деятельности (экономический эффект, экологические послед-

ствия, конфликты между отдельными видами природопользования);

- характеристика масштабов воздействия на экосистемы (пространственных, временных, интенсивности, кумулятивного эффекта);
- систематизация причин и факторов риска.

Риски, связанные с ОЯ, являются результатом взаимодействия опасностей с уязвимостью и подверженностью антропогенных и естественных систем. Таким образом, можно говорить о риске, если на некоторой территории наблюдаются опасные или неблагоприятные природные явления и существует некий объект (реципиент риска), находящийся под их вероятным воздействием и уязвимый для них. Изменения, как в климатической системе, так и в социально-экономических процессах, являются движущими факторами опасности, подверженности и уязвимости [1].

Риск ОЯ (R) можно концептуально представить в виде следующего уравнения:

$$R = H^* V^* E^*, \quad (1)$$

где H – опасность, V – уязвимость, E – количество/стоимость объектов, подверженных риску.

Все компоненты, расположенные в правой части уравнения риска, являются пространственно-неоднородными. Для определения каждого из них необходимы собственные модели, наряду с моделью расчета риска, объединяющей эти факторы.

Задача определения значений компонента опасности является наиболее сложной. Для каждого типа

опасности (например, наводнение, оползень, шторм) должны быть определены так называемые сценарии опасности, которые представляют собой ОЯ определенной величины (интенсивности и частоты) (например, карты уровня наводнения для периодов повторяемости 10, 50 и 100 лет). Для анализа сценариев ОЯ необходимы различные подходы к моделированию, зависящие от типа опасности, масштабов анализа, наличия входных данных. В общем случае, требуется отдельный анализ для определения вероятности возникновения ОЯ заданной величины, за которым следует анализ причин возникновения опасности, а также расчет пространственного распространения ОЯ.

В качестве реципиента риска ОЯ могут выступать население, отрасли экономики, экосистемы, технические объекты и процессы, инфраструктура. Все перечисленное группируется термином «объекты, подверженные риску». Кроме того, термин «подверженность» используется для обозначения тех объектов, которые связаны с потенциальными потерями.

Моделирование компоненты подверженности заключается в создании информационной модели региона исследования, содержащей данные, относящиеся к объектам, подверженным риску. Для каждой конкретной области выбирается свое наполнение модели подверженности исходя из целей исследований. Данные, относящиеся к объектам, подверженным риску, очень часто основаны на картах, представляющих местоположение зданий с атрибутами, связанными с их использованием, размером, типом и количеством людей, присутствующих в них в разные периоды суток и года. Для других объектов, подверженных риску, таких как транспортная инфраструктура и тип землепользования, в качестве основных материалов используются данные дистанционного зондирования.

Все объекты, подверженные риску, имеют определенный уровень уязвимости. Уязвимость описывает характеристики и состояние объекта, которые определяют его восприимчивость к разрушительным последствиям ОЯ. Существует множество аспектов уязвимости, связанных с физическими, социальными, экономическими и экологическими условиями. При рассмотрении только физической уязвимости ее можно определить как степень повреждения объекта (например, здания), подверженного воздействию ОЯ определенного уровня интенсивности (например, высота уровня воды).

Данные об уязвимости часто собираются в виде кривых уязвимостей, которые указывают на взаимосвязь между величиной ущерба конкретному типу объекта, подверженного риску, и уровнями

интенсивности конкретного ОЯ. Подготовка кривых уязвимости является сложной задачей: они могут быть получены или эмпирическим путем на основе прошлых событий, для которых известны интенсивность и степень повреждения, или посредством численного моделирования. Основными методами моделирования уязвимости являются: кривые уязвимости (функции), матрицы уязвимости (дискретный аналог кривой уязвимости) и индексные методы.

Существует широкий спектр мер риска [2]. При этом риск может быть выражен в абсолютном или относительном выражении. Абсолютный риск для населения может быть выражен как индивидуальный риск (годовая вероятность того, что отдельный человек, подверженный воздействию, погибнет), или как социальный риск (связь между годовой вероятностью и числом людей, которые могут погибнуть). Абсолютный экономический риск может выражаться в показателях средних ежегодных потерь, максимально возможных потерь или других показателей, которые рассчитываются на основе серии сценариев, каждый из которых характеризуется частотой (вероятностью) и ожидаемыми денежными потерями. Оценка экономического риска позволяет установить возможные потери для объектов техносферы в денежном выражении, а оценка экологического риска – возможные потери для природы [3].

Можно также провести различие между прямым риском (который представляет собой риск, непосредственно связанный с воздействием опасности) и косвенным риском (который может произойти позже, как следствие прямого воздействия). Примером прямого риска является уничтожение физических объектов (зданий, транспортной инфраструктуры), а примерами косвенных потерь являются потеря доходов и объемов экономического производства, нарушение транспортных сетей, приводящее к увеличению продолжительности поездки и т.д. Значительную часть потерь трудно и даже невозможно оценить количественно, например социальное или психологическое воздействие ОЯ.

Если компоненты уравнения риска (1) могут быть численно оценены и представлены в виде карт для определенного набора сценариев опасности и объектов, подверженных риску, то риск может быть проанализирован непосредственно с использованием этого уравнения.

Операции геопространственного анализа используются для определения подверженности в форме пересечения между объектами, подверженными риску, и зоной опасности для каждого сценария опасности. Для каждого объекта, подверженного риску, уровень интенсивности воздействия также определяется посредством оверлейных операций. Эти

значения интенсивности используются в сочетании с типом объекта, чтобы найти соответствующую кривую уязвимости, которая затем используется, чтобы найти значение уязвимости. Способ, которым выражено количество элементов, подверженных риску (например, количество зданий, количество людей), определяет метрику риска. Умножение количества подверженных объектов на уязвимость производится для всех типов объектов в рамках одного и того же сценария ОЯ. Результирующее значение представляет собой потери, зависимость которых от временной вероятности возникновения сценария ОЯ можно отобразить на графике, называемом кривой риска. Эта процедура повторяется для всех возможных сценариев опасности. Нужно построить, по крайней мере, три различных сценария, хотя рекомендуется использовать, по меньшей мере, 6 событий с разным периодом повторяемости, чтобы лучше аппроксимировать кривую риска. Затем площадь под кривой вычисляется путем интегрирования всех потерь с учетом соответствующих годовых вероятностей. Можно создавать кривые риска для всей области исследования или для разных пространственных единиц.

При этом существуют ситуации, когда рассмотренные количественные методы сравнения рисков не подходят. Это может быть связано с тем, что не хватает данных для количественной оценки компонентов, таких как частота и интенсивность ОЯ, физическая уязвимость объектов, подверженных ОЯ. Другая причина заключается в том, что хотелось бы учитывать ряд компонентов уязвимости, которые не имеют количественного выражения, такие как социальная уязвимость, экологическая уязвимость и т.д. В этих случаях для определения рисков и уязвимости используют подход, основанный на индикаторах (индексах), позволяющий количественно сравнивать различные области или регионы. Данные по каждому из показателей собираются на определенном пространственном уровне. Затем эти показатели стандартизируются путем масштабирования их между 0 и 1. Таким образом, получаемые индексы уязвимости, опасности и риска также представляются относительными значениями от 0 до 1, что не дает возможности количественной оценки рисков в натуральном или монетарном выражении, но позволяет сравнивать различные области или регионы между собой.

В рамках индексного подхода компоненты риска из уравнения (1) могут быть выражены через систему индикаторов, характеризующих текущую ситуацию, а также возможное развитие событий. Подобная система индикаторов должна содержать факторы состояния экосистемы, а также антропогенной и «климатической» нагрузки.

В целях представления исторических и ожидаемых изменений в экосистеме Азовского моря предлагается использовать следующую систему индикаторов.

Все индикаторы разделены на три группы: индикаторы состояния, индикаторы нагрузки, индикаторы тенденций. Индикаторы состояния связаны с определением условий среды и экологического статуса морских и прибрежных экосистем. Индикаторы нагрузки дифференцируются по видам хозяйственной деятельности. Индикаторы тенденций характеризуют динамику социально-экономических и экологических показателей в современный период.

Индикаторы состояния: батиметрия; тип донных отложений; рельеф прибрежной территории; типы почв; содержание гумуса в почвах, %; тип береговой растительности; средний уровень моря, м; температура воды, С; соленость воды, ‰; концентрация хлорофилла «а» в прибрежных и морских водах, мг/м³; концентрация питательных (биогенных) веществ в прибрежных и морских водах, мг/м³; концентрация растворенного кислорода, мг/л; первичная продукция фитопланктона, гСорг/м²/год; продукция кормовых объектов зоопланктона, гСорг/м²/год; биомасса кормовых объектов бентоса, г/м²; запасы рыбы, тыс.т; индекс видового разнообразия фитопланктона; индекс видового разнообразия зоопланктона; индекс видового разнообразия ихтиофауны; индекс загрязнения водной толщи; индекс загрязнения донных отложений.

Индикаторы нагрузки: морские порты и терминалы (объем товарооборота); наличие и интенсивность использования транзитных транспортных путей (плотность потока судов); морской рыбный промысел (вылов рыбы); аквакультура (объем товарной рыбы, гибель молодняка аквакультуры); добыча нефти и газа (расположение нефтегазодобывающих платформ); расширение масштабов застройки прибрежных территорий; сельскохозяйственная деятельность в прибрежной зоне; коммунальное водоотведение (сброс сточных вод); размер рекреационных зон; численность отдыхающих; численность городского населения; плотность сельского населения.

Индикаторы тенденций: социально-экономические тенденции за последние 10 лет (динамика населения, производства и т.д.); экологические тенденции за последние 10 лет (динамика эмиссии загрязняющих веществ, уровня загрязнения вод и т.д.); предыстория экстремальных природных явлений.

В качестве интегральной модели, связывающей систему индикаторов для расчета риска ОЯ, могут

быть использованы или байесовские сети, позволяющие учитывать факторы неопределенности переменных в явном виде [4], или пространственная многокритериальная оценка.

Расчет характеристик опасных процессов в регионе Азовского моря может быть выполнен с использованием системы прогнозирования ОЯ «EX-MARE», разрабатываемой в ЮНЦ РАН. В ее состав входят следующие модельные компоненты, реализующие отдельные методы прогнозирования опасных природных явлений [5]: гидродинамика Азовского моря; нагонные явления в дельте р. Дон; штормовые явления; ледовые явления; «цветение» фитопланктона; дефицит растворенного кислорода – «заморные» явления; разливы нефти.

Анализ рисков ОЯ является важным элементом в реализации стратегии устойчивого развития и морского пространственного планирования. В настоящей работе предложена система индикаторов представления исторических и ожидаемых изменений в экосистеме Азовского моря, предназначенная для оценки ОЯ в регионе. Ориентация на индексный подход позволяет проводить анализ в случае отсутствия данных для полноценной количественной оценки, а также при необходимости учета факторов, не имеющих количественного выражения.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-35-60043 мол_а_дк.

Список литературы

1. Доклад о климатических рисках на территории Российской Федерации. – Санкт-Петербург. 2017. 106 с.
2. Селютин В.В. Систематизация теоретических методов измерения и сравнения экономических рисков // Экология. Экономика. Информатика (7–12 сентября 2014) Сборник статей в 2 т. Т.1: Системный анализ и моделирование экономических и экологических систем. Южный федеральный университет: Издательство Южного федерального университета. – Ростов-на-Дону, 2014. С. 356–362.
3. Осипов В.И. Природные опасности и стратегические риски в мире и в России // Экология и жизнь. 2009. № 11–12 (96–97). С. 4–16.
4. Кулыгин В.В. Геоинформационная модель оценки рисков опасных природных явлений на основе байесовских сетей // Экология. Экономика. Информатика. Серия: Системный анализ и моделирование экономических и экологических систем. 2017. Т. 1. № 2. С. 66–72.
5. Berdnikov S.V., Dashkevich L.V., Kulygin V.V., Sheverdyaev I.V., Tretyakova I.A., Yaitskaya N.A. Ex-Mare – Forecasting System Of Natural Hazards In The Azov Sea Region. // Geography, Environment, Sustainability. 2018. Vol.11. No 2. p. 29–45. DOI-10.24057/2071–9388-2018–11-2–29-45

DEVELOPMENT OF THE AZOV SEA ECOSYSTEM' STATE INDICATORS FOR THE NATURAL HAZARDS ASSESSMENT

V.V. Kulygin

Federal Research Center The Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don
kulygin@ssc-ras.ru

Abstract. The active development of coastal areas prone to many natural hazards and the creation there high-value and vulnerable facilities create prerequisites for the growth of damage from hazardous events. In this connection, the importance of land-use planning in the coastal zone increases significantly. That plans should contain mechanisms for preventing the occurrence of hazards and reducing their consequences. The objective of this study is developing a system of indicators of the Azov Sea ecosystem' state for the natural hazards assessment. The main components involved in the risk assessment (hazard, exposure, and vulnerability) are considered. The quantitative and index approaches to risk assessment are characterized. The first one allows perform a comparative «cost-benefit» analysis of risk reduction measures. The second approach is less data demanding and allows working with poorly formalized factors. Within the framework of the index approach, a system of indicators for presenting historical and expected changes in the ecosystem of the Sea of Azov has been developed. It consists of three groups: status indicators, pressure indicators, and trend indicators. The EX-MARE forecasting system was selected as a model basis for calculating the characteristics of natural hazards in the Azov Sea region.

Keywords: natural hazards, system of indicators, risks, the Sea of Azov

References

1. [Report on climatic risks in the territory of the Russian Federation]. 2017. St. Petersburg. 106 p. (In Russian).
2. *Selyutin V.V.* 2014 [Systematization of theoretical methods for measuring and comparing economic risks]. In: Ecology. Economy. Informatics. (September 7–12, 2014) Collection of articles in 2 volumes, vol. 1: System analysis and modeling of economic and ecological systems. Publisher: Southern Federal University. – Rostov-on-Don. pp. 356–362. (In Russian).
3. *Osipov V.I.* 2009. [Natural Dangers and Strategic Risks in the World and in Russia] Ecology and Life. 11–12(96–97): 4–16. (In Russian).
4. *Kulygin V.V.* 2017. [Geoinformational model of natural hazards risk assessment on the basis of bayesian networks] Ecology. Economy. Informatics. «System analysis and modeling of economic and ecological systems» Series. 1(2): 66–72. (In Russian).
5. *Berdnikov S.V., Dashkevich L.V., Kulygin V.V., Sheverdyayev I.V., Tretyakova I.A., Yaitskaya N.A.* 2018. Ex-Mare – Forecasting System Of Natural Hazards In The Azov Sea Region. Geography, Environment, Sustainability. 11(2): 29–45. DOI-10.24057/2071–9388-2018–11-2–29-45