
ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ И ГЕОЭКОЛОГИЯ

УДК 910.1 + 910.3

ПРИМЕНЕНИЕ ЭКСПЕРТНЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО РАЙОНИРОВАНИЯ БЕЛОГО МОРЯ

© 2016 г. В.Б. Коробов, К.А. Середкин

Северо-Западное отделение Института океанологии имени П.П. Ширшова РАН, Архангельск, Россия
e-mail: szoioran@mail.ru, log23@rambler.ru

Поступила в редакцию 06.08.2015 г.

Проведено сравнение двух методов к районированию акваторий, основанных на балльных классификациях и экспертных оценках влияющих факторов: метода анализа иерархий и метода прямых влияний. Методы апробированы при районировании Белого моря по степени экологической напряженности танкерных перевозок. Показано, что применение этих методов к одному и тому же объекту дают разные результаты: происходит изменение границ и площади районов различной экологической напряженности: от 2.9 до 14.7%, а для всей акватории в целом – от 3 до 33%, что весьма значимо в практических приложениях, в частности при размещении баз аварийного реагирования на разливы нефти в море. Высказано требующее дальнейшей проверки предположение о большей адекватности метода прямых влияний.

Ключевые слова: экологическое районирование, акватория, аналитическая сеть, Белое море.

Введение. Районирование территорий и акваторий можно отнести к типу задач, когда тот или иной участок требуется отнести к определенному классу (поясу, зоне и т.д.). Технически районирование можно провести различными способами. Остановимся на одном из них – *балльных классификациях*. Этот метод оперирует величинами различных размерностей, обладает большой универсальностью, возможностью включать в себя экспертные оценки, что позволяет решать широкий круг задач [3].

Чтобы учесть различный вклад факторов в формирование объекта, используют весовые коэффициенты, на которые умножают соответствующие балльные оценки. Весовой коэффициент (ВК) обычно выражается в долях единицы или в процентах, он показывает, какую роль играет фактор: чем ВК больше, тем фактор значимее, и наоборот.

Постепенно специалисты пришли к необходимости учета прямых, косвенных и опосредованных связей для количественных оценок ВК. Так возникли *аналитические сети* или *сетевой подход* к построению модели задачи для оценки вклада различных факторов в конечный результат. Происхождение названия “сетевой”, связано с видом схемы взаимного влияния природных и антропогенных факторов в экосистеме моря – внешне она напоминает сеть (рис. 1).

Чтобы найти количественные характеристики этих связей, Т. Саати и его коллегами [10, 14] были разработаны алгоритмы, по сути, являющиеся расширением ранее разработанного им и получившего большую популярность, несмотря на обнаруженные в нем некоторые недостатки [4], *метода анализа иерархий* (МАИ).

Однако механическое перенесение, пусть и с некоторым усложнением, технологий МАИ на аналитические сети привело в некоторых случаях к неожиданным результатам. Так, при образовании циклов значения ВК ряда факторов становятся нулевыми или бесконечно малыми, чего быть не может в принципе, если исходить из определения ВК как доли вклада фактора в конечный результат.

В этой связи нами были разработаны [5] алгоритмы, реализация которых основана на иных принципах, существенно упрощающих процедуру экспертного оценивания связей между факторами и не приводящих к обнулению ВК. Этот подход назван нами методом прямых влияний, поскольку не требует, как у Т. Саати, составления матрицы взаимных связей.

Для выяснения отличий двух рассмотренных подходов к учету сетевых связей в предлагаемой статье мы провели сравнительную оценку результатов экологического районирования одно-

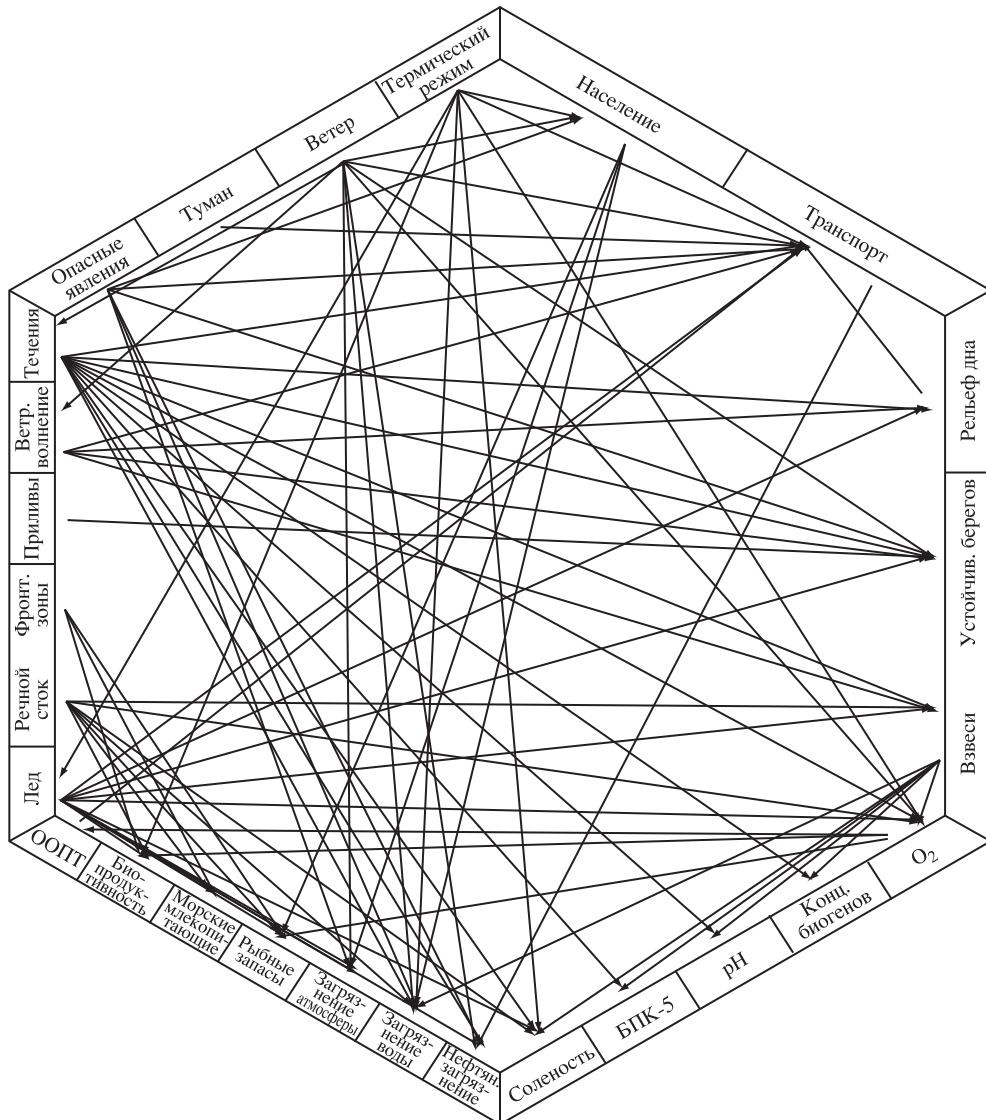


Рис. 1. Схема взаимного влияния факторов, определяющих формирование условий среды в Белом море.

го и того же водного объекта **методом анализа иерархий** (МАИ) и **методом прямых влияний** (МПВ) (один из вариантов представления модели в сетевом виде).

Объект исследования. Задача исследования – районирование акватории Белого моря с целью выделения участков, в наибольшей степени подверженных риску поражения экосистем при транспортировке нефтяных углеводородов танкерным флотом.

Этот водоем представляет собой очень сложный природный объект [2, 11], для которого характерно наличие ледяного покрова в течение нескольких месяцев в году, мощные приливы, амплитуда которых достигает нескольких метров, значительный речной сток, сильная изрезанность береговой черты и неравномерное распределение глубин, обусловливающих сильную простран-

ственную неравномерность всех протекающих в море процессов и явлений. На акваторию моря, естественно, также оказывают влияние процессы и экологическая ситуация прилегающих и удаленных территорий [6, 11, 13].

С недавнего времени вся акватория Белого моря стала использоваться для транспортировки нефти и нефтепродуктов танкерным флотом, ее интенсивность в последние годы стремительно растет и достигла уже миллионов тонн в год. Учитывая, что аварии танкеров и трубопроводов в океанах и морях, а также на нефтедобывающих платформах способны нанести колоссальный ущерб морским и береговым экосистемам [7–9], определение участков, в пределах которых ущерб будет наибольшим, имеет важное прикладное значение для разработки как превентивных мер по защите

природной среды, так и планов по ликвидации последствий нефтяных разливов.

Методика исследования. При реализации данной задачи рассматривали 27 факторов, разбитых на 6 групп [1]. Весовые коэффициенты – внутригрупповые и межгрупповые – находили посредством МАИ. Балльные оценки показателей факторов рассчитывали при помощи специально построенных для каждого показателя шкалы. Расчеты интегрального показателя $I_{R,L}$ – суммарной балльной оценки, производили по формуле [3]:

$$I_L = \sum_{j=1}^R k_j \sum_{i=1}^n k_{j,i} p_i,$$

где p_i – балльные оценки показателей, k_i – весовые коэффициенты групп факторов, $k_{j,i}$ – весовые коэффициенты факторов, $i = 1 \dots n$ – количество факторов в группе, $j = 1 \dots R$ – количество групп, L – количество участков, на которые разбивается акватория (в данном случае их 88). Значения I_L находили для каждого участка.

Для $I_{R,L}$ была разработана специальная вербально-числовая шкала, позволившая провести районирование акватории Белого моря по степени экологической напряженности при транспортировке нефти [12].

Полученные результаты. На рисунках представлены результаты экологического районирования акватории Белого моря с использованием для количественной оценки экологических связей метода анализа иерархий (рис. 2) и с использованием метода прямого влияния – учетом связей только первого порядка (непосредственное влияние одного фактора на другой) – рис. 3.

При реализации стандартной – строго по Т. Саати [10] – технологии аналитических сетей оказалось, что 4 связи оказались “лишними”: от фактора “соленость” к фактору “текущие”, от фактора “нефтяное загрязнение” к фактору “кислород”, от фактора “соленость” к фактору “взвеси” и от фактора pH к фактору “взвеси”. Соответственно, 18 (!) факторов приобрели нулевые значения.

Полученные же методом МВП границы районов экологической напряженности (см. рис. 3) заметно отличаются от районирования без учета сетевого взаимодействия факторов. Еще более наглядно это видно на рис. 4, на котором представлены изолинии отклонения границ районов, рассчитанных с применением аналитической сети, от полученных путем применения обычных экспертных технологий (МАИ).

В количественном выражении площади акваторий с разной степенью экологической напряженности по результатам двух оценок изменились неодинаково, причем знак этих изменений

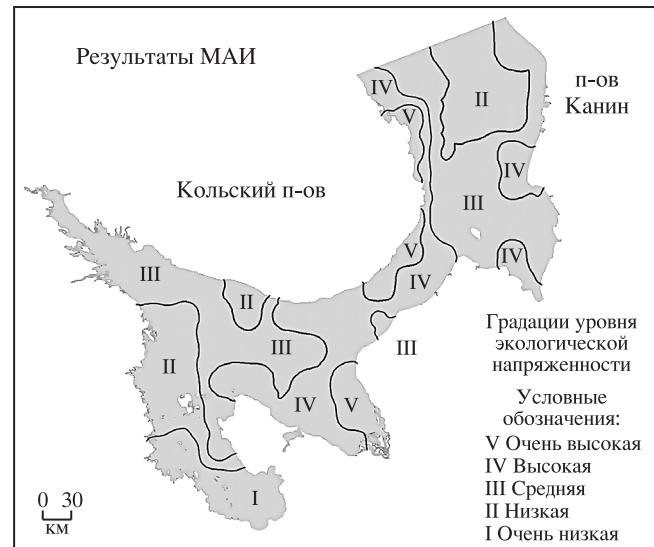


Рис. 2. Схема экологической напряженности Белого моря, полученная при помощи МАИ.

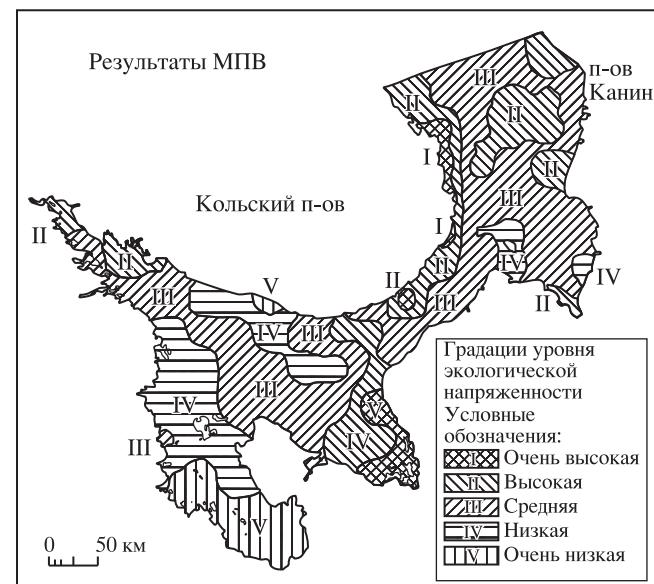


Рис. 3. Схема экологической напряженности Белого моря, полученная при помощи МВП.

разнонаправлен: одни площади увеличились на 21%, другие уменьшились на 33%, но ни одна из выделенных градаций не осталась неизменной (таблица).

Обсуждение результатов. Применение новой методологии, как и следовало ожидать, привело к изменению результата: изменились не только границы, но и площади каждой градации. При этом общая оценка напряженности снизилась, причем весьма ощутимо, за счет уменьшения площадей с более высокими градациями. Конечно, это частный случай и обобщающих выводов из него де-

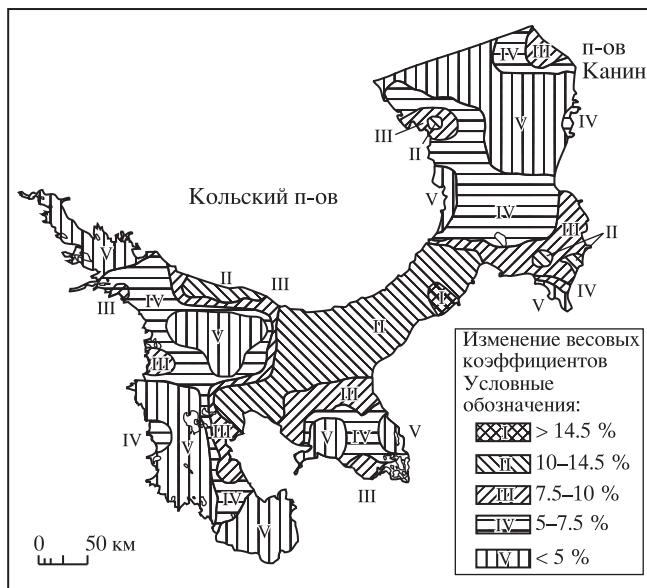


Рис. 4. Различия в классификации акватории между МАИ и МВП.

лать не стоит, но то, что такое перераспределение будет иметь место всегда, сомнению не подлежит. Следует обратить внимание на существенное уменьшение (более 40%) площади наиболее неблагоприятных, с экологической точки зрения, градаций. По нашему мнению, это может быть связано с процедурой проведения экспертного опроса. В сетевых методологиях они могут проводиться в несколько стадий: сначала оцениваются факторы по их вкладу в конечный результат, а затем – по их влиянию друг на друга. Такая двойная оценка позволяет сгладить экстремальные суждения, что и произошло в нашем случае, и тем самым сделать их статистически более корректными. Понятно, что данное предположение нуждается в проверке.

Суть и причины различий результатов районирования следующие. В Кандалакшском заливе в целом наблюдается снижение уровня градации на территории залива со среднего на низкий (суммарный балл изменился в диапазоне от 5.1 до

7.6%). К такому результату привело уменьшение весовых коэффициентов ряда влияющих факторов – течений, приливов, туманов, устойчивости берегов и нефтяного загрязнения. Исключение составила часть залива, прилегающая с севера к пос. Умба и п-ову Турий – уровень напряженности здесь возрос от среднего до высокого (2.9–5.8%) из-за повышения ВК таких факторов, как лед, рельеф дна, особо охраняемая природная территория (ООПТ).

Уровень экологической напряженности на небольшом участке Двинского залива, прилегающем с юга к части Летнего берега на участке от р. Сюзьма до г. Северодвинска, увеличен с высокого до очень высокого уровня (от 6.5 до 8.6%). На такое изменение в наибольшей степени повлияли следующие факторы: речной сток, лед, БПК₅, население, ООПТ. Часть залива к западу от о-ва Мудьюгский изменила уровень градации экологической напряженности с очень высокого уровня на высокий (от 5.2 до 6.5%) из-за изменения ВК таких факторов, как термический режим, БПК₅, биопродуктивность, рыбные запасы, нефтяное загрязнение и, в меньшей степени, некоторых других.

В южной части Мезенского залива наблюдается ситуация, аналогичная Двинскому заливу: на части акватории понизился уровень экологической напряженности. В суммарных баллах наблюдается снижение уровня градации с высокого на средний на северо-восток от м. Абрамовский (от 8 до 10.5%). Этому способствовало повышение роли туманов, приливов, устойчивости берегов, рыбных запасов и нефтяного загрязнения. На акваториях, прилегающих с востока и запада к этому мысу, уровень экологической напряженности снизился со среднего до низкого по причине увеличения ВК следующих факторов: туман, течения, приливы. Этот же набор факторов привел к снижению уровня градаций на участках акватории, прилегающих ближе к Воронке и Горлу.

На акватории моря к северу от Онежского п-ова уровень напряженности снизился с высокого до среднего (с 10 до 14.2%), а на части акватории к

Таблица. Изменение площадей (*S*) акваторий экологической напряженности в зависимости от метода классификации

| Номер градации | <i>S</i> при помощи МАИ, км ² | <i>S</i> при помощи МПВ, км ² | Разница, км ² | Доля от градации, % |
|----------------|--|--|--------------------------|---------------------|
| I | 8120 | 7864 | -256 | -3.26 |
| II | 18 810 | 23 820 | 5010 | 21.03 |
| III | 33 740 | 34 646 | 906 | 2.62 |
| IV | 18 835 | 14 124 | -4711 | -33.36 |
| V | 10 547 | 9599 | -948 | -9.88 |

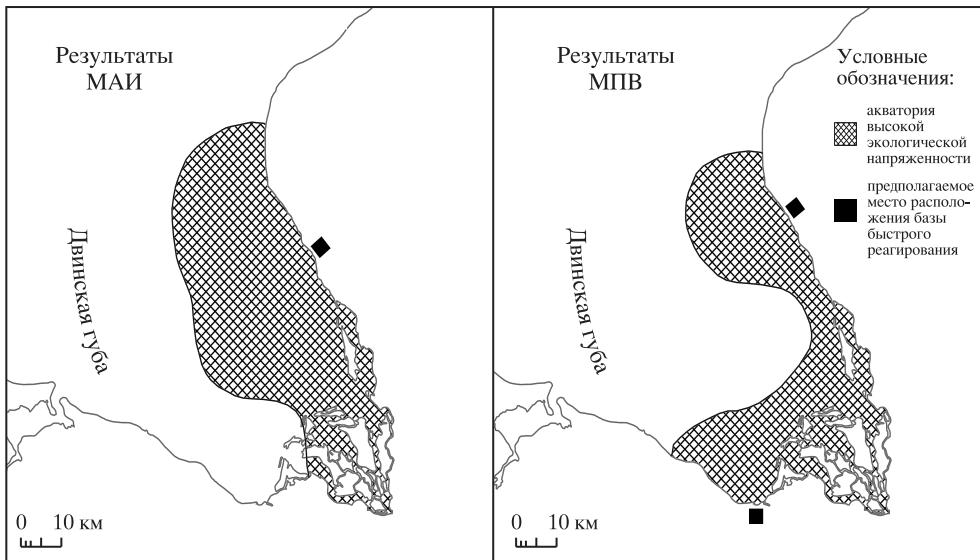


Рис. 5. Изменение возможного расположения баз быстрого реагирования на аварийные разливы нефти в зависимости от границ районов высокой экологической напряженности.

западу – со среднего до низкого уровня (от 4 до 13%).

Восточный берег Кольского полуострова в целом стал иметь более низкий уровень экологической напряженности.

В Воронке несколько секторов изменили свои суммарные баллы в большую сторону, перейдя из низкого в средний уровень градации (от 4.5 до 7.2%). Изменения для этих секторов вызваны увеличением ВК таких факторов, как ветер и опасные явления. Ряд секторов изменил уровень градации в меньшую сторону (от 2.4 до 10.2%) из-за уменьшения ВК влияющих факторов: туманы, течения, приливы и нефтяное загрязнение.

Горло Белого моря характеризуется изменением уровня градации экологической напряженности в сторону уменьшения. Участки акватории, прилегающие к Кольскому полуострову, понизили уровень с очень высокого до высокого (от 5.8 до 14%), а морские участки – с высокого до среднего и со среднего до низкого (от 5 до 14.7%). На это изменение наибольшее воздействие оказало снижение ВК у тумана, течений, транспорта, рыбных запасов и нефтяного загрязнения.

Для бассейна Белого моря в целом характерно изменение градаций в сторону уменьшения: участки центральной части изменили уровень со среднего на низкий (от 10 до 13.5%), а участки, прилегающие к суше, – с высокого на средний (от 5.6 до 13.5%). Основные факторы, повлиявшие на эти переходы, – туман, фронтальные зоны, биопродуктивность, нефтяное загрязнение.

Таким образом, применение сетевых подходов к получению весовых коэффициентов позволяет

более эффективно и точно получать эти коэффициенты, что, в свою очередь, дает возможность более корректно проводить районирование на основании классификационных моделей.

Заключение. Осуществить строгую научную сравнительную оценку адекватности двух методов экологического районирования в настоящее время не представляется возможным ввиду отсутствия соответствующих методик. С нашей точки зрения, сетевой подход более достоверен, поскольку в явном виде учитывает взаимодействие факторов, формирующих исследуемый объект.

С практической стороны, критерием адекватности проведенного районирования акватории Белого моря может быть принят ущерб, нанесенный экосистеме при разных видах хозяйственной и иной деятельности. Однако для этого необходимо разработать схему экологического мониторинга именно под эту задачу.

Мы полагаем, что при принятии решения о расположении мест базирования средств ликвидации аварийных разливов нефти расчеты с помощью метода прямых влияний позволяют вернее выбрать площадки для складирования специальных средств борьбы с нефтяным загрязнением (рис. 5).

Для других хозяйствующих субъектов – администрации порта, рыбаков, транспортных компаний – эти сведения также могут представлять определенный интерес при планировании размещения объектов инфраструктуры и маршрутов передвижения.

В теоретическом плане сетевой подход дает возможность количественно оценить уровень

связи между компонентами объекта. С математической точки зрения, весовые коэффициенты представляют собой вектор. Путем стандартных преобразований его можно развернуть в матрицу парных связей всех сочетаний компонентов объекта. Это дает возможность получить числовую меру связей между компонентами, в данном случае – факторами, формирующими объект.

Располагая сведениями о степени взаимосвязи между компонентами, можно более обоснованно выбрать метод для моделирования процессов, протекающих внутри этого объекта. Так, если зависимости слабые, то не следует для их изучения применять регрессионный анализ и включать их в строго детерминируемые модели. Низкая степень связи также дает основание исключить моделирование тех или иных факторов, а высокая, наоборот, убеждает в необходимости учета таких связей при разработке частных моделей. Иерархия степени зависимости одних компонентов от других также позволяет выстроить схему приоритетов изучения объекта.

Использование сетевого подхода для решения целого класса частных экологических и природоохранных проблем Белого моря – тема будущих исследований авторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Завернина Н.Н., Коробов В.Б. Факторы, влияющие на экологическую ситуацию Белого моря // Вестн. Архангельского государственного технического университета. Серия “Прикладная геоэкология”. 2007. Вып. 70. С. 27–37.
2. Залогин Б.С., Косарев А.Н. Моря. М.: Мысль, 1999. 400 с.
3. Коробов В.Б. Экспертные методы в географии и геоэкологии. Архангельск: Изд-во Поморского ун-та, 2008. 236 с.
4. Коробов В.Б., Тутыгин А.Г. Классификационные методы решения эколого-экономических задач. Архангельск: Изд-во Поморского ун-та, 2010. 310 с.
5. Коробов В.Б., Тутыгин А.Г., Середкин К.А. Метод прямого расчета весовых коэффициентов влияющих факторов в аналитических сетях // Проблемы региональной экологии. 2013. № 3. С. 40–45.
6. Котова Е.И., Коробов В.Б., Шевченко В.П. Особенности формирования ионного состава снежного покрова в прибрежной зоне западного сектора арктических морей России // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 6; URL: www.science-education.ru/106-7843 (дата обращения: 21.12.2012).
7. Кузнецов А.Н., Федоров Ю.А. Нефтяное загрязнение в водных экосистемах. Закономерности естественной трансформации. Саарбрюккен: LAP Lambert Acad. Publ., 2011. 196 с.
8. Немировская И.А. Нефть в океане (загрязнение и природные потоки). М.: Научный мир, 2013. 432 с.
9. Патин С.А. Нефтяные разливы и их воздействие на морскую среду и биоресурсы. М.: ВНИРО, 2008. 507 с.
10. Саати Т.Л. Принятие решений при зависимостях и обратных связях: аналитические сети. М.: ЛИБРОКОМ, 2009. 360 с.
11. Система Белого моря. Т. II. Водная толща и взаимодействующие с ней атмосфера, криосфера, речной сток и биосфера / Отв. ред. Лисицын А.П., ред. Немировская И.А. М.: Научный мир, 2012. 784 с.
12. Ружникова Н.Н. Геоэкологическое районирование акватории Белого моря при транспортировке нефтяных углеводородов // Изв. ВУЗов. Северо-Кавказский регион. 2012. № 6 ЕН. С. 93–98.
13. Шевченко В.П. Влияние аэрозолей на среду и морское осадкообразование в Арктике. М.: Наука, 2006. 226 с.
14. Adams B. Super Decisions Limit Matrix Calculations [Электронный ресурс]. URL: http://isahp.lascomedia.com/dati/pdf/4_0164_Adams.pdf (дата обращения: 20.03.2015).

Application of Expert Networks for Environmental Zoning of the White Sea

V.B. Korobov, K.A. Seredkin

*Shirshov Institute of Oceanology, Northwestern Branch, Russian Academy of Sciences, Arkhangelsk,
Russia
e-mail: szoioran@mail.ru, log23@rambler.ru*

A comparison of the two approaches to zoning water area based on score classifications and expert assessments of influencing factors: the Analytic Hierarchy Process (AHP) and the method of direct influence (MoDI), is made. Methods were tested for the zoning of the White Sea according to the degree of environmental tension of tanker transportations. It is shown that the application of these methods to the same object produce different results – a change of borders and areas of different environmental tension ranging from 2.9 to 14.7%, and for the whole water area – from 3 to 33%, which is very significant in practical applications, particularly when placing bases emergency response to oil spills at sea. It is suggested requiring further verification assumption that the most adequate method is the method of direct influence.

Keywords: ecological zoning, water area, analytical network, the White Sea.

doi:10.15356/0373-2444-2016-3-81-87