

МЕТОДОЛОГИЯ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 502.171:556.3:005.334

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО РИСКА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

© 2017 г. А.В. Ошкадер*, Л.Е. Подлипенская**

**Керченский государственный морской технологический университет,
ул. Орджоникидзе, 82, г. Керчь, Республика Крым, 298309 Россия.*

E-mail: anna_oshkader@mail.ru

***ГОУ ВПО ЛНР «Донбасский государственный технический университет», пр. Ленина, 16, г. Алчевск, ЛНР.*

E-mail: lida.podlipensky@gmail.com

Поступила в редакцию 11.08.2016 г.

Статья посвящена разработке подхода к количественной оценке экологических рисков территорий при использовании подземных источников водоснабжения (на примере Керченского полуострова). Процесс оценивания рисков включает пять этапов: вычисление экологических показателей, унификация показателей степени опасности, интеграция показателей степени опасности, оценка возможности проявления опасности и оценка экологических рисков. Ключевой этап выполнения оценки – унификация разнородных частных показателей с применением нелинейных шкалирующих функций, которая дает возможность сформировать систему экологических индикаторов с безразмерной шкалой оценок в интервале от 0 до 1. Основное преимущество предложенного подхода заключается в возможности его расширения за счет как увеличения числа экологических показателей в каждой отдельной группе, так и введения новых критериев, характеризующих определенные экологические условия с учетом региональных особенностей. Методология может быть адаптирована к оценке экологических ситуаций на территориях не только при условии использования подземных вод для водоснабжения, но и при других значимых для региона экологических проблемах.

Ключевые слова: *экологический риск, подземные воды, Керченский полуостров, модель оценки, дефицит воды, качество воды, техногенная нагрузка, плотность населения, гидрогеоэкологический риск, унификация, интеграция.*

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы обусловлена необходимостью обеспечения населения Керченского полуострова питьевой водой в условиях дефицитности поверхностных источников. Население полуострова на протяжении длительного времени испытывает недостаток качественной питьевой воды. Запасы поверхностных вод практически отсутствуют, что обуславливает проблемы в водоснабжении. Для данного региона характерна высокая зависимость от внешнего источника. Днепровская вода с мая 2014 г. не поступает в Крым. В результате возрастает роль других источников, в частности подземных вод.

Керченский полуостров, являясь восточной частью Крымского полуострова, характеризуется особыми природными и социально-экономическими

условиями, которые обусловлены его географическим положением, климатом, орографией, геологическим строением, а также уровнем социального и хозяйственного освоения. Протяженность полуострова с запада на восток составляет около 90 км, с севера на юг – от 17 до 50 км. Общая площадь – 2830 км², что составляет около 10% от всей территории Крыма [10]. Территория Керченского полуострова включает Ленинский муниципальный район и Городской округ Керчь (рис. 1). В состав Ленинского района входит г. Щёлкино, пгт. Ленино и пгт. Багерово, 64 села и пос. Егорово, которые объединены в 27 муниципальных образований: 1 городское поселение и 26 сельских поселений. Общая численность населения полуострова составляет 209,93 тыс. чел, т.е. в среднем 11% от общей численности населения Крыма. Из них 70% проживает в городском округе Керчь, а 30% – в Ленинском муниципальном районе [30].



Рис. 1. Административно-территориальное устройство Керченского полуострова.

По размерам техногенной нагрузки весь Керченский полуостров можно условно разделить на две крупные зоны: г. Керчь, в котором сконцентрированы все промышленные предприятия полуострова, и Ленинский район, специализирующийся на производстве сельскохозяйственной продукции [21]. Это, в свою очередь, обуславливает специфику воздействия на компоненты окружающей среды [18].

На Керченском полуострове проблема качественного водоснабжения населения стоит особо остро.

Подземные воды в некоторых районах – практически единственный источник воды для населения. В этой связи становится очевидной актуальность задачи геоэкологической оценки территории полуострова с учетом таких факторов, как гидрогеологические условия, водообеспеченность региона и качество питьевой воды, уровень техногенной нагрузки и плотность населения и пр.

Цель исследования – разработка методического подхода к количественной оценке экологических

Таблица 1. Основные характеристики водохранилищ Северо-Крымского канала (СКК), расположенных и используемых на территории Керченского полуострова [10,11]

№	Название	Местоположение: Ленинский район	Полный объем, млн м ³	Назначение	Ведомственная принадлежность
1	Зеленоярское	с. Зеленый Яр	3.02	водоснабжение	Управление СКК
2	Ленинское	с. Ленинское	7.7	водоснабжение	Собственность муниципальных образований Ленинского района
3	Самарлинское	с. Виноградное	8.09	водоснабжение	Собственность муниципальных образований, г. Щелкино
4	Сокольское	с. Сокольское	2.26	рекреация	Собственность муниципальных образований Ленинского района
5	Станционное	с. Станционное	24.0	водоснабжение	Управление СКК
6	Фронтное	с. Фронтное	35.0	водоснабжение	Управление СКК

Таблица 2. Количественные характеристики водохранилищ, используемых для водоснабжения Керченского полуострова по состоянию на 2014 г. [9]

Водохранилища	Полный объем, млн м ³	Полезный объем, млн м ³	Приток, млн м ³	Расход на водоснабжение, млн м ³ /год
Ленинское	7.7	6.7	5	2.907
Самарлинское	8	7	2	1.054
Станционное	24	22.8	32.325	27.443
Фронтное	35.5	29.5	16.108	4

рисков территорий при использовании подземных источников водоснабжения (на примере Керченского полуострова).

ВОДОСНАБЖЕНИЕ КЕРЧЕНСКОГО ПОЛУОСТРОВА

Современная система питьевого водоснабжения полуострова базируется на использовании сети источников централизованного и децентрализованного водоснабжения. Основным источником централизованного водоснабжения Керченского полуострова – Северо-Крымский канал. Водоснабжение населенных пунктов полуострова водой из канала осуществляется через систему водохранилищ (табл. 1).

Полный объем водохранилищ изменяется от 2.26 млн м³ в Сокольском водохранилище до 35 млн м³ во Фронтном. В основном водохранилища предназначены для водоснабжения и только Сокольское – для рекреации. На рис. 2

представлена гидрологическая сеть полуострова с указанием основных источников водоснабжения (Северо-Крымский канал с системой водохранилищ и водозаборы подземных вод).

В прямой зависимости от наполнения водой канала для водоснабжения Керченского полуострова находятся режимы работ четырех водохранилищ: Ленинского, Самарлинского, Станционного и Фронтного (табл. 2).

Водоснабжение г. Керчь осуществляется из Станционного водохранилища, в 2014 г. расход воды которого составил 27.44 млн м³, а Ленинского района – из Ленинского, Самарлинского и Фронтного, суммарный расход воды которых составил 7.96 млн м³.

В мае 2014 г. ситуация с обеспечением водоснабжения Республики Крым, в том числе и Восточного Крыма, усугубилась в связи с прекращением подачи днепровской воды в Северо-Крымский канал. Фактическое наполнение



Рис. 2. Карта-схема Керченского полуострова с обозначением Северо-Крымского канала и водохранилищ.

водохранилищ уменьшилось практически до «мертвого» объема [10]. Тем не менее канал продолжает функционировать, для его наполнения используются подземные воды Крыма [9]. Наполнение водохранилищ Керченского полуострова во многом зависит от дождевых, ливневых и талых вод. В настоящее время на полуострове забор воды осуществляется из природных источников четырех типов – Северо-Крымский канал, подземные воды, местный сток и морская вода.

Объем водозабора из водохранилищ, питаемых водами канала, значительно превосходит водозабор из других источников. Подземные воды на полуострове распространены не повсеместно, и объемы водозабора сравнительно небольшие по сравнению с поверхностными источниками. При этом их роль в водоснабжении полуострова, в частности сельских районов, существенна. В Ленинском районе мезотический горизонт в сложных гидрохимических условиях эксплуатируется практически всеми хозяйствами. Минерализация подземных вод составляет 1.1–8.4 г/дм³ [10, 11]. Величина водоотбора в 2013 г. составила 0.837 тыс. м³/сут [10]. В 2015 г. объем добычи подземных вод с минерализацией до 1.5 г/дм³ в Ленинском районе составил 0.9 тыс. м³/сут, а в г. Керчь – 0.2 тыс. м³/сут. Дефицит воды ответственно составил 11.7 и 28.9 тыс. м³/сут [11].

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ РИСКОВ

Подземные воды дефицитны из-за природных условий территории. Одновременно с позиций оценки социально-экономического состояния региона, они являются важной составляющей водообеспечения, а также стратегическим ресурсом в случае возникновения чрезвычайных ситуаций при условиях недоступности, недостаточности или же невозможности использования поверхностных вод [14]. Это обуславливает необходимость рассмотрения и анализа экологических рисков для обоснования мероприятий по рациональному использованию подземных вод и обеспечения экологической безопасности Керченского полуострова. При оценке необходимо учесть разноплановые факторы: гидрогеологические условия, водообеспеченность региона и качество питьевой воды, уровень техногенной нагрузки и плотность населения.

При оценивании рисков часто возникают сложности, связанные с разной трактовкой понятия «риск», методиками его оценки, учетом регионального аспекта и возможностями

использования различных составляющих риска, которые формируют итоговую оценку.

В данной работе под экологическим риском понимается *оценка возможности появления опасности с учетом последствий, возникающих при использовании подземных источников водоснабжения, в сложившихся экологических условиях территории.*

Оценка риска может выполняться как покомпонентно, так и интегрально в различных комбинациях в зависимости от полноты данных и задач исследования. Возможные варианты: оценка вероятности или возможности нежелательного события (P); оценка «ущерба» последствий в результате реализации данного события (Y); свертка (зачастую произведение $R = P \cdot Y$) вероятности (возможности) и «ущерба»; оценка риска в двумерных координатах (P; Y).

Количественная оценка экологического риска – основа для принятия управленческих решений. В практике оценивания рисков сложились традиционные подходы, среди которых следует выделить работы В.А. Бокова [6], П.А. Ваганова [7], А.Г. Шмаля [31], В.В. Яковлева [32] и др. Важная роль в разработке методологии оценки природных рисков принадлежит специалистам Института геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, в том числе В.И. Осипову [16, 17, 27], А.Л. Рагозину [26, 28], И.В. Галицкой [8] и др.

Л.Н. Карлин и А.А. Музалевский в своей работе [12] осветили существующие подходы оценки риска. Интересным представляется индикаторно-рискологический подход количественной оценки экологического риска, основанный на идеологии индикаторов, индексов и индексов качества. А.А. Швыряев и В.В. Меньшиков используют детерминированный подход к оценке риска и рассчитывают его величину как отношение оценки концентрации привнесенного вещества к оценке безопасной концентрации [30].

В работах А.П. Белоусовой риск рассматривается как произведение уязвимости подземных вод к внешнему загрязнению и возможного удельного ущерба от загрязнения. Защищенность и техногенная нагрузка выражаются через индексы, раскрывающие индикаторы воздействия и состояния подземных вод. Предложенный метод позволяет проводить комплексные оценки экологического состояния подземных вод в различных масштабах с целью обеспечения устойчивого развития подземной гидросферы как компонента окружающей среды [3–5].

Таблица 3. Характеристика опасных событий

Обозначение	Описание	Индикатор оценки последствий ситуации
S_1	опасность потребления воды низкого качества населением	индикатор качества воды (ИКВ)
S_2	опасность дефицита воды из подземных водозаборов	индикатор дефицита воды (ИДВ)
S_3	опасность, связанная с техногенной нагрузкой в районе использования подземных источников	индикатор техногенной нагрузки (ИТН)
S_4	опасность, обусловленная высокой плотностью населения	индикатор плотности населения (ИПН)

Для оценки региональных экологических рисков на территориях, где подземные воды играют существенную роль в структуре водоснабжения, предлагается использовать подход, который позволяет учитывать наиболее существенные факторы, формирующие экологическую ситуацию в регионе, их разноплановость, разномасштабность и нелинейный характер синергетического взаимодействия [13, 24].

В качестве приоритетного субъекта при оценке экологического риска рассматривается население определенной территории. При этом оценка риска выступает в качестве интегрального критерия напряженности экологической ситуации в регионе, сформированной экологическими условиями.

Расчет экологического риска включает определение меры возможности (или вероятности)

появления события, представляющего опасность; определение меры последствий реализации опасности. Характеристика опасностей, которые подлежат оценке в данной работе, представлена в табл. 3.

Опасные события S_1 – S_4 приводят к экологическим ситуациям различной степени напряженности. Оценка последствий реализации опасных событий S_1 – S_4 (в виде относительного ущерба от 0 до 1) выполнена на основании соответствующих унифицированных экологических индикаторов (со значениями в интервале от 0 до 1) [20]: ИКВ, ИДВ, ИТН, ИПН.

Общая схема оценки экологических рисков при использовании подземных вод [19] представлена на рис. 3. Процедура оценивания рисков включает пять этапов (табл. 4).

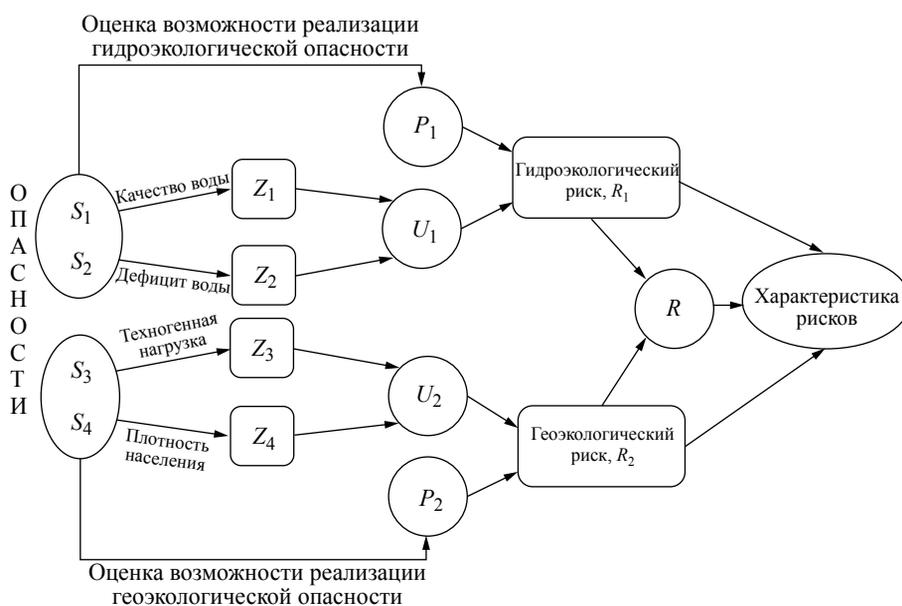


Рис. 3. Схема оценки экологических рисков при использовании подземных вод.

Таблица 4. Этапы оценки экологических рисков при использовании подземных вод в качестве источника водоснабжения населения

Система показателей	Расшифровка	Дополнение
Этап 1 – Вычисление экологических показателей		
$\left\{ \begin{array}{l} \text{ИЗПВ} = f_1(x_{11}, \dots, x_{1n_1}) \\ D = f_2(x_{21}, \dots, x_{2n_2}) \\ \text{УТН} = f_3(x_{31}, \dots, x_{3n_3}) \\ \text{ПН} = f_4(N; S) \end{array} \right. \quad (1)$	<p>ИЗПВ – индекс загрязнения подземных вод – функция концентрации загрязняющих веществ (ЗВ) в воде из подземных источников;</p> <p>D – дефицит воды на одного человека (м³/сут), зависит от параметров водозабора, численности населения и др.;</p> <p>УТН – уровень техногенной нагрузки – функция показателей интенсивности и степени опасности антропогенной и техногенной деятельности в районе использования подземных источников;</p> <p>ПН – плотность населения в районе – функция численности населения (N) и площади района проживания (S)</p>	<p>На этом этапе могут использоваться и другие показатели, характеризующие различные аспекты использования подземных вод в качестве источника воды для населения, например, индекс опасности HQ неканцерогенных веществ или показатели канцерогенного риска для канцерогенных веществ*</p>
Этап 2 – Унификация показателей степени опасности		
$\left\{ \begin{array}{l} Z_1 = \psi_1(\text{ИЗПВ}) \\ Z_2 = \psi_2(D) \\ Z_3 = \psi_3(\text{УТН}) \\ Z_4 = \psi_4(\text{ПН}) \end{array} \right. \quad (2)$	<p>Ψ₁–Ψ₄ – унифицирующие функции, обеспечивающие переход от исходных показателей в разнородных шкалах к унифицированной шкале [a; b] [1]</p>	<p>В работе используется шкала [0;1]. Вид унифицирующих функций обосновывается, исходя из характера влияния исходных показателей на формирование напряженности экологической ситуации; рекомендовано выполнять унификацию, используя привязку по апробированным критериям оценки</p>
Этап 3 – Интеграция показателей степени опасности		
$\left\{ \begin{array}{l} U_1 = G_1(Z_1; Z_2) \\ U_2 = G_2(Z_3; Z_4) \end{array} \right. \quad (3)$	<p>U₁ – интегральный показатель степени опасностей S₁ и S₂;</p> <p>U₂ – интегральный показатель степени опасностей S₃ и S₄;</p> <p>G₁, G₂ – функции, выполняющие интеграцию показателей и описывающие степень комплексности воздействия опасностей</p>	<p>Вид функций G₁ и G₂ подбирается исходя из эколого-социальной направленности агрегированных показателей, определяемой региональными требованиями в оценке экологических рисков</p>
Этап 4 – Оценка возможности проявления опасностей		
$\left\{ \begin{array}{l} P_1 = \frac{q}{Q} \\ P_2 = \int_{x_1}^{x_2} f(x) dx \end{array} \right. \quad (4)$	<p>P₁ – оценка возможности проявления гидроэкологической опасности;</p> <p>q – объем поставок воды из подземных источников;</p> <p>Q – объем поставок воды из всех имеющихся источников;</p> <p>P₂ – оценка возможности проявления геоэкологической опасности, оценивается при помощи соответствующего закона распределения вероятностей</p>	<p>Оценивание возможности (вероятности) проявления опасностей может выполняться как статистическими, так и эвристическими методами</p>

Таблица 4 (окончание)

Система показателей	Расшифровка	Дополнение
Этап 5 – Оценка экологических рисков		
$\begin{cases} R_1 - U_1 \cdot P_1 \\ R_2 - U_2 \cdot P_2 \\ R = \gamma_1 R_1 + \gamma_2 R_2 \end{cases} \quad (5)$	R_1 – гидроэкологический риск [22]; R_2 – геоэкологический риск; R – гидрогеоэкологический риск [19]; γ_1, γ_2 – весовые коэффициенты; $\gamma_1, \gamma_2 \geq 0; \gamma_1 + \gamma_2 = 1$.	Весовые коэффициенты γ_i отражают значимость i -й компоненты риска в итоговой оценке; могут быть представлены как константами, так и нелинейными функциями, позволяющими управлять итоговой оценкой риска в зависимости от напряженности экологической ситуации в регионе [22]

*Примечание. Руководство по оценке риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду (Р 2.1.10.1920-04). [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.infosait.ru/norma_doc/46/46715/

УНИФИКАЦИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

Большое значение для унификации имеет рассмотрение значений показателей по отношению к экологическому состоянию изучаемого компонента окружающей природной среды, поскольку увеличение значений различных показателей по-разному соотносится со степенью их влияния на экологическую ситуацию. Например, увеличение концентрации нитратов приводит к ухудшению экологической ситуации, причем при более высоких значениях данного показателя опасность увеличивается в существенно нелинейной степени. При этом некоторые показатели, например рН, характеризуются допустимым интервалом значений, в пределах которого опасность оценивается как минимальная.

Для унификации частных показателей используется проецирование показателей на единичную шкалу [0,1] таким образом, что наименьшее влияние фактора опасности соответствует нулевому значению i -го унифицированного показателя, а наибольшее – значению унифицированного показателя, равного единице [15].

При выборе типа функции перехода необходимо учитывать как ее возможности, так и назначение выходных индикаторов. В зависимости от типа применяемых шкал различают [1]: а) линейные функции для равномерной шкалы; б) нелинейные функции для неравномерной шкалы.

Под шкалированием в данном случае понимается переход от одной (исходной) системы оценок в другую систему (от 0 до 1). Функция, с помощью которой осуществляется преобразование исходных показателей в унифицированные, называется

шкалирующей. Линейное шкалирование работает хорошо в тех случаях, когда данные распределены равномерно по диапазону изменения [2]. Применение линейного шкалирования к данным, которые распределены неравномерно или содержат выбросы, приводит к тому, что данные оказываются распределенными в очень узком диапазоне [33]. Линейные и кусочно-линейные шкалирующие функции проходят наиболее широкое применение ввиду простоты их вычисления и доступности интерпретации интервалов шкалирования и шкалирующих констант, хотя существуют примеры использования нелинейных шкал для оценки экологических ситуаций [25].

Необходимо отметить, что использование линейных шкал имеет существенный недостаток, связанный с равномерностью результирующей шкалы, что не всегда приемлемо при оценке конкретных реальных экологических ситуаций. Например, при оценке качества подземных вод Керченского полуострова было рассмотрено 26 показателей химического состава воды [14]. Большой разброс значений наблюдался по величине общей жесткости, при этом наибольшая экологическая опасность по данному показателю имеет место при значениях, существенно превышающих ПДК. В подобных случаях предпочтительно применять нелинейное шкалирование, причем вид выбираемой для этих целей функции перехода нужно соотносить с особенностями оцениваемого показателя. Частое применение находят расширяющиеся, сужающиеся, а также монотонная шкалы [1].

Расширяющаяся шкала обычно используется в том случае, когда колебания интенсивности явления играют важную роль при слабых его

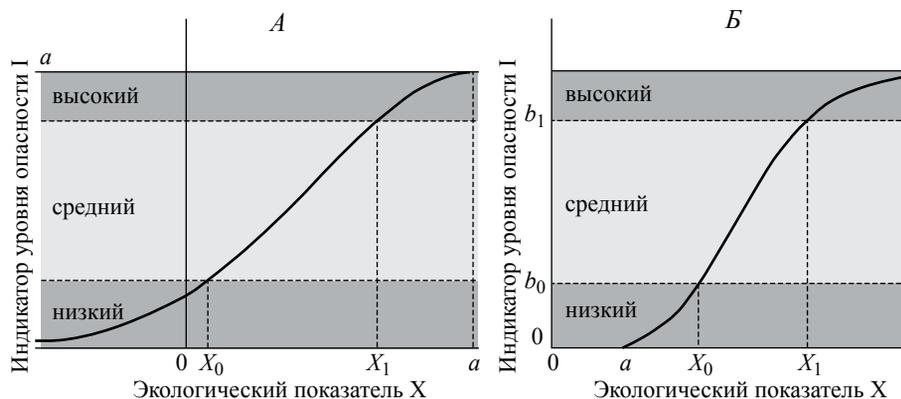


Рис. 4. Нелинейные шкалы перехода к унифицированным показателям.

проявлениях, а по мере его усиления его изменения играют меньшую роль. Сужающаяся шкала, наоборот, может быть использована, когда колебания интенсивности явления играют большую роль при сильных его проявлениях, а по мере его ослабления изменения интенсивности менее значимы. Таким образом, сгущение оценок следует производить в той части опорной шкалы, где она дает наибольшую информацию [1].

В данной работе предложены к рассмотрению новые нелинейные шкалы, которые могут использоваться для неравномерного преобразования при неограниченности слева (рис. 4А) или справа (рис. 4Б) входных интервалах $[a_i, b_i]$.

Рассмотрим предложенные функции.

Гауссовская функция (6). График функции представлен на рис. 4А:

$$I = c \cdot e^{-r(x-a)^2} \tag{6}$$

где параметры r и c находим из условия привязки функции шкалирования к результирующей оценочной шкале (7):

$$\begin{cases} I(x_0) = b_0 \\ I(a) = 1. \end{cases} \tag{7}$$

В результате получаем формулы (8) и (9) для расчета параметров r и c :

$$r = \frac{-\ln b_0}{(x_0 - a)^2} \tag{8}$$

$$c = 1. \tag{9}$$

Особенность данной функции – неограниченность по оси абсцисс слева, конечная точка кривой характеризуется координатами $(a;1)$, которой

соответствует наивысший уровень опасности (индикатор I равен 1).

2. Экспоненциальная сигмоида (логистическая функция) (10). График функции представлен на рис. 4Б:

$$I = \frac{(x-a) \cdot e^{r(x-a)}}{(x-a) \cdot e^{r(x-a)} + d} \tag{10}$$

где a – начало исходного интервала значений показателя x (шкалирующая константа), а параметры r и d находятся из условия привязки функции шкалирования к результирующей оценочной шкале в двух точках (11):

$$\begin{cases} I(x_0) = b_0 \\ I(x_1) = b_1 \end{cases} \tag{11}$$

В результате решения системы (11) с учетом вида функции (10) получаем формулы для расчета параметров r (12) и d (13):

$$r = \frac{1}{x_1 - x_0} \ln \left(\frac{1 - b_0}{1 - b_1} \cdot \frac{b_1}{b_0} \cdot \frac{x_1 - a}{x_0 - a} \right) \tag{12}$$

$$d = \frac{1 - b_0}{b_0} \cdot (x_0 - a) \cdot e^{r(x_0 - a)} \tag{13}$$

Введенная нами модифицированная экспоненциальная сигмоида отличается от классической [29] наличием множителя $(x-a)$ перед экспонентой. Это позволяет установить начальное значение индикатора I в точке a , равное нулю, которое соответствует самому низкому уровню опасности. В результате данная функция становится неограниченной по оси абсцисс справа.

Выбор вида шкалирующей функции зависит как от самих показателей, так и от объекта

оценивания. Применение представленных шкалирующих функций позволяет получить унифицированные показатели – индикаторы, характеризующие состояние различных экологических условий.

Таким образом, в результате применения предложенной технологии унификации частных показателей формируется система стандартных значений экологических индикаторов со значениями в интервале от 0 до 1, при этом каждый из них характеризует свою сторону экологической ситуации, являясь оценкой последствий реализации соответствующей опасности. Далее производится интеграция уже унифицированных показателей и оценка рисков (см. рис. 3) с их последующей характеристикой.

ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКИХ РИСКОВ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПОДЗЕМНЫХ ВОД НА КЕРЧЕНСКОМ ПОЛУОСТРОВЕ

На Керченском полуострове подземные источники представлены колодцами, родниками и скважинами. Для оценки экологических рисков использовались данные собственных полевых исследований экологического состояния источников подземных вод в пределах полуострова; материалы ГУП «Крымгеология» (г. Симферополь), Керченской городской СЭС (с 01.01.2015 г. Филиал ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии в Республике Крым и городе федерального значения Севастополе» в г. Керчь и Ленинском районе); а также официальные данные территориального органа Федеральной службы государственной статистики по Республике Крым¹. В ходе обследования территории полуострова получены и сгруппированы данные по: отдельным типам источников подземных вод (родники, колодцы и артезианские скважины); отдельным населенным пунктам полуострова (села, поселки, города); административно-территориальным единицам (сельские и поселковые советы, городские округа). Полученные данные объединены в четыре группы.

Группа 1. Качество воды подземных источников. Включает данные химического анализа проб воды из трех типов водозаборов по 26-ти показателям, из них:

– 7 органолептических: запах при 20°C и 60°C, привкус при 20°C, окраска, мутность, осадок, прозрачность;

– 17 химических: водородный показатель, окисляемость, азот аммиачный, азот нитритный, азот нитратный, общая жесткость, сухой остаток, хлориды, сульфаты, железо, медь, мышьяк, фтор, марганец, щелочность, кальций, калий+магний;

– 2 санитарно-бактериологических: общие колиформы и общее микробное число.

Группа 2. Водообеспеченность из подземных водозаборов. Включает информацию о дислокации подземных источников, сведения о водопользователях, глубине залегания водоносных горизонтов, возрасте водовмещающих пород, объемах нормативного (разрешенного) водозабора, дебите источников, инженерно-техническом состоянии водозаборных сооружений, наличии и соблюдении режима зон санитарной охраны (ЗСО).

Группа 3. Техногенная нагрузка в пределах территориальных единиц. Включает сведения о промышленных предприятиях, объектах малой энергетики, сельского хозяйства, ЖКХ, транспортной инфраструктуры, а также об объектах рекреации.

Группа 4. Пространственное распределение населения. Включает данные о количестве населения в отдельных населенных пунктах полуострова и площади административно-территориальных единиц.

Согласно подходу, сформированному ранее (см. табл. 4), авторами получена модель оценки экологического риска для Керченского полуострова, представленная пятью системами уравнений.

1. Формирование базы для оценки рисков при использовании подземных вод для населения:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{ИЗПВ} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{\text{ПДК}_i} \\ D = \frac{Q \cdot N - V}{N} \\ \text{УТН} = \sum_{j=1}^6 K_j^j \cdot B_j \\ \text{ПН} = \frac{N}{S} \end{array} \right. ; \quad (14)$$

где C_i – концентрация i -го загрязняющего вещества (ЗВ); ПДК_i – предельно-допустимая концентрация i -го ЗВ, n – количество приоритетных ЗВ; Q – норма водопотребления, V – норма водозабора, N – численность населения; $B_j \in [0; 2]$ – балльная оценка

¹Территориальный орган Федеральной службы государственной статистики по Республике Крым [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://gosstat.crimea.ru>

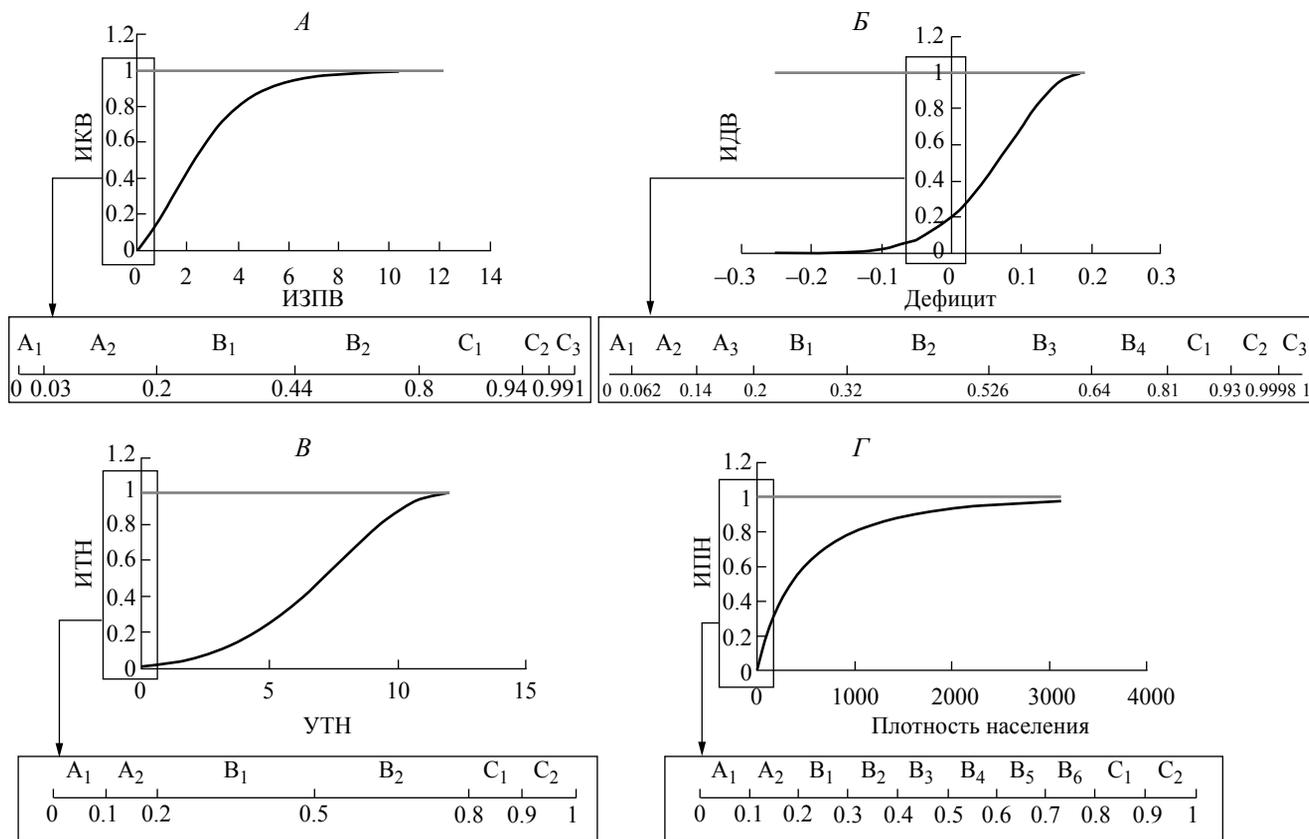


Рис. 5. Графическое представление унификации экологических показателей и их выходных шкал. Унифицированные шкалы имеют градации: А – хорошее состояние; В – среднее состояние; С – плохое состояние, и соответствующие им подклассы [19].

уровня техногенной нагрузки и $K_7 \in [0;1]$ – поправочный коэффициент; S – площадь района проживания.

2. Унификация показателей:

$$\left\{ \begin{aligned} \text{ИКВ} &= \frac{\text{ИЗПВ} \cdot e^{0.4621 \cdot \text{ИЗПВ}}}{\text{ИЗПВ} \cdot e^{0.4621 \cdot \text{ИЗПВ}} + 6.3496} \\ \text{ИДВ} &= e^{-44.383(D-0.19)^2} \\ \text{ИТН} &= e^{-0.027163 \cdot \text{УТН} - 13} \\ \text{ИПН} &= \frac{\text{ПН} \cdot e^{0.000522 \cdot \text{ПН}}}{\text{ПН} \cdot e^{0.000522 \cdot \text{ПН}} + 421.4441} \end{aligned} \right. ; \quad (15)$$

3. Интеграция показателей:

$$\left\{ \begin{aligned} U_1 &= \alpha_1 \cdot Z_1 + \alpha_2 \cdot Z_2 \\ U_2 &= 0.5 \cdot Z_3 + 0.5 \cdot Z_4 \\ \text{ИПН} &= \frac{Z_2 \cdot e^{23105 \cdot Z_2}}{Z_2 \cdot e^{23105 \cdot Z_2} + 1.2699} ; \\ \alpha_1 &= 1 - \alpha_2 \\ \alpha_1, \alpha_2 &\geq 0 \end{aligned} \right. ; \quad (16)$$

4. Оценка возможности проявления рисков:

$$\left\{ \begin{aligned} P_1 &= \frac{Q_1}{Q_1 + Q_2 + Q_3} \\ P_2 &= 1 \end{aligned} \right. \quad (17)$$

где Q_1, Q_2, Q_3 – объем поставок воды из подземных источников, поверхностных источников и иных источников соответственно.

5. Итоговая оценка рисков:

$$\left\{ \begin{aligned} R_1 &= U_1 \cdot P_1 \\ R_2 &= U_2 \cdot P_2 \\ R &= \gamma_1 R_1 + \gamma_2 R_2 \\ \gamma_1 &= \frac{R_2 \cdot e^{23105 \cdot R_2}}{R_2 \cdot e^{23105 \cdot R_2} + 1.2699} ; \\ \gamma_2 &= 1 - \gamma_1 \\ \gamma_1, \gamma_2 &\geq 0 \end{aligned} \right. \quad (18)$$

В результате первичной обработки данных по группам показателей 1–4 с помощью системы

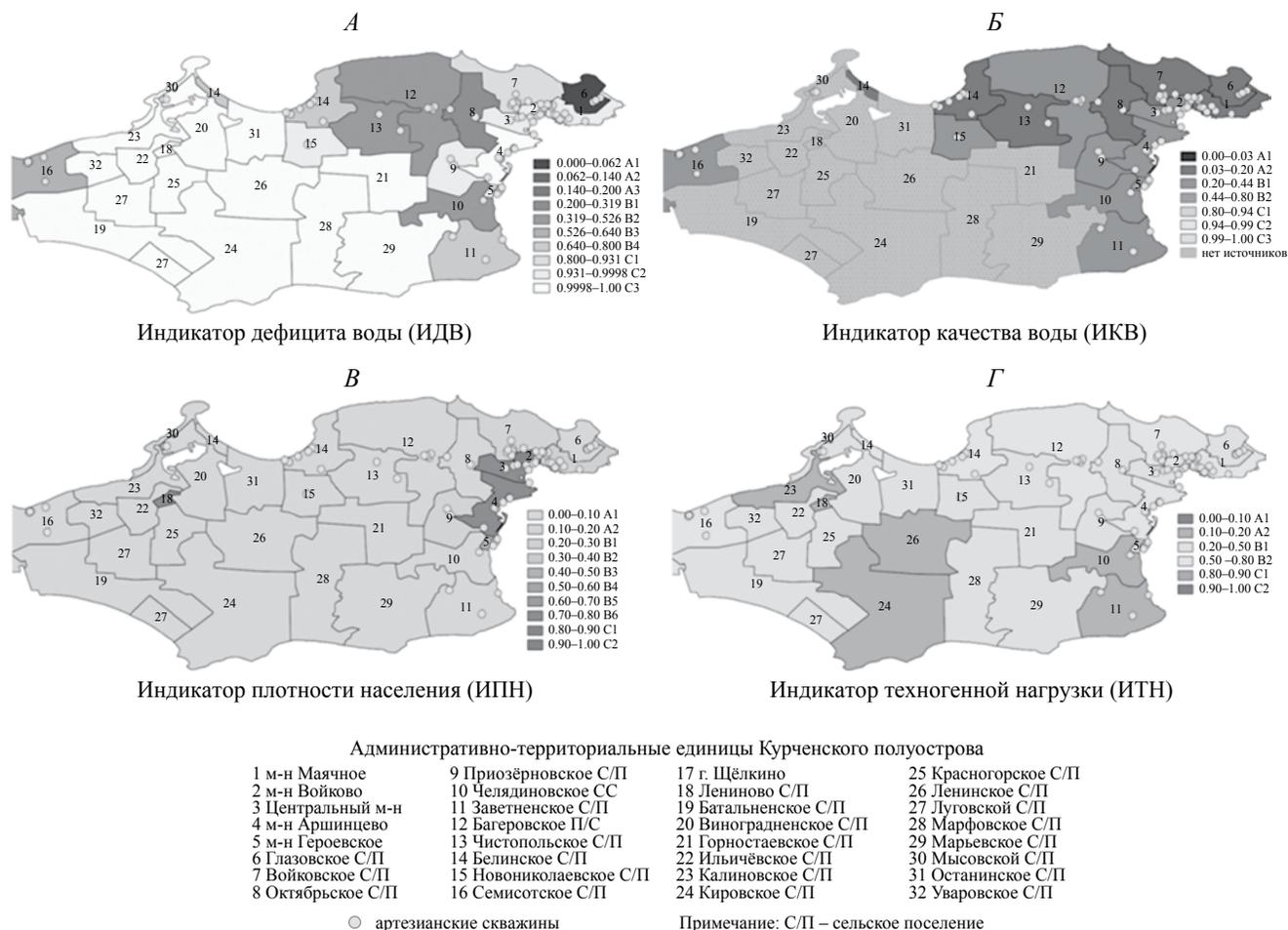


Рис. 6. Распределение значений экологических индикаторов на территории Керченского полуострова.

уравнений (14) получены частные показатели: индекс загрязнения подземных вод (ИЗПВ), дефицит (D), уровень техногенной нагрузки (УТН), плотность населения (ПН) для районов Керченского полуострова. Поскольку показатели разнородны и имеют различные размерности, проведена их унификация (рис. 5).

Экологические индикаторы и их пространственное распределение на территории Керченского полуострова показаны на рис. 6 в виде геоэкологических карт. В ходе графического анализа карты ИДВ (рис. 6А) установлено, что единственный район, в котором отсутствует дефицит воды из подземных источников, – Глазовское с/п; районы № 8, 10–14, 16 характеризуются недостаточной водообеспеченностью. В остальных районах значение ИДВ близко к единице, что свидетельствует о крайне недостаточной водообеспеченности. Согласно карте ИКВ (рис. 6Б), районы с чистыми подземными водами – Глазовское, Войковское, Октябрьское, Чистопольское, Белинское сельские поселения и микрорайон Маячное.

К районам с грязными водами отнесен г. Щёлкино, с загрязненными – микрорайон Героевское, в районах № 2–4, 9–12, 15, 16 подземные воды характеризуются как умеренно-загрязненные. В остальных районах водозабор из подземных источников отсутствует. Анализ карты ИПН (рис. 6В) показывает, что в целом территория полуострова характеризуется низкой плотностью населения, за исключением территории городского округа Керчь, г. Щёлкино и с/п Лениново. Согласно карте ИТН (рис. 6Г) большинство районов характеризуется средним и низким уровнем общей техногенной нагрузки.

Таким образом, анализ геоэкологических карт показал, что административные районы Керченского полуострова характеризуются большим количеством комбинаций значений индикаторов, что затрудняет сравнительный анализ районов с учетом интегрального действия всех индикаторов. Следовательно, возникает необходимость произвести комплексную оценку экологической ситуации на полуострове с учетом особенностей

Таблица 5. Распределение уровня гидрогеоэкологического риска на Керченском полуострове по нелинейной модели

№ п/п	Районы	R ^{ггэ} , сценарий 1		R ^{ггэ} , сценарий 2	
		значение	класс	значение	класс
1	м-н Маячное	0.368		0.821	
2	м-н Войково	0.708		0.876	
3	м-н Центральный	0.557	В	0.862	С
4	м-н Аршинцево	0.711		0.902	
5	м-н Героевское	0.786		0.887	
6	Глазовское с/п	0.172	А	0.172	А
7	Войковское с/п	0.501	В	0.65	В
8	Октябрьское с/п	0.153	А	0.156	А
9	Приозёрновское с/п	0.737	В	0.747	
10	Челядиновское с/п	0.101		0.346	
11	Заветненское с/п	0.131	А	0.514	В
12	Багеровское с/п	0.302	В	0.348	
13	Чистопольское с/п	0.155	А	0.192	А
14	Белинское с/п	0.356	В	0.615	
15	Новониколаевское с/п	0.152	А	0.775	В
16	Семисотское с/п	0.325		0.468	
17	г. Щёлкино	0.424	В	0.913	
18	Лениново с/п	0.477		0.942	
19	Батальненское с/п	0.15		0.905	
20	Виноградненское с/п	0.2	А	0,911	
21	Горностаевское с/п	0.205	В	0.912	
22	Ильичёвское с/п	0.179		0.908	
23	Калиновское с/п	0.134		0.903	
24	Кировское с/п	0.093		0.898	
25	Красногорское с/п	0.153		0.905	С
26	Ленинское с/п	0.102	А	0.9	
27	Луговской с/п	0.141		0.904	
28	Марфовское с/п	0.141		0.904	
29	Марьевское с/п	0.136		0.903	
30	Мысовской с/п	0.22		0.913	
31	Останинское с/п	0.21	В	0.913	
32	Уваровское с/п	0.157	А	0.906	

Примечание – м-н – микрорайон; с/п – сельское поселение. Класс А – низкий риск, класс В – средний риск, класс С – высокий риск.

выделенных экологических условий и их значимости в интегральной оценке.

Оценка риска производилась на основе нелинейной модели по двум сценариям:

Сценарий 1. «Поверхностные и подземные воды» – соответствует ситуации, когда структура водопользования представлена поверхностными и подземными водами. Гидрогеоэкологический риск определяется степенью использования подземных вод в общем балансе водопользования на полуострове.

Сценарий 2. «Отсутствие поверхностных вод» – соответствует чрезвычайной ситуации

прекращения водоснабжения из поверхностных источников и исключительного использования существующих подземных источников.

Расчет производится с помощью систем уравнений (14–18). Результаты расчета гидроэкологического и геоэкологического представлены двумерными матрицами (рис. 7), а гидрогеоэкологического риска по модели (18) по двум сценариям представлены в табл. 5.

Анализ табл. 5 показал, что при развитии ситуации по сценарию 1 уровень гидрогеоэкологического риска в 53% районов полуострова характеризуется как «низкий» (класс А),

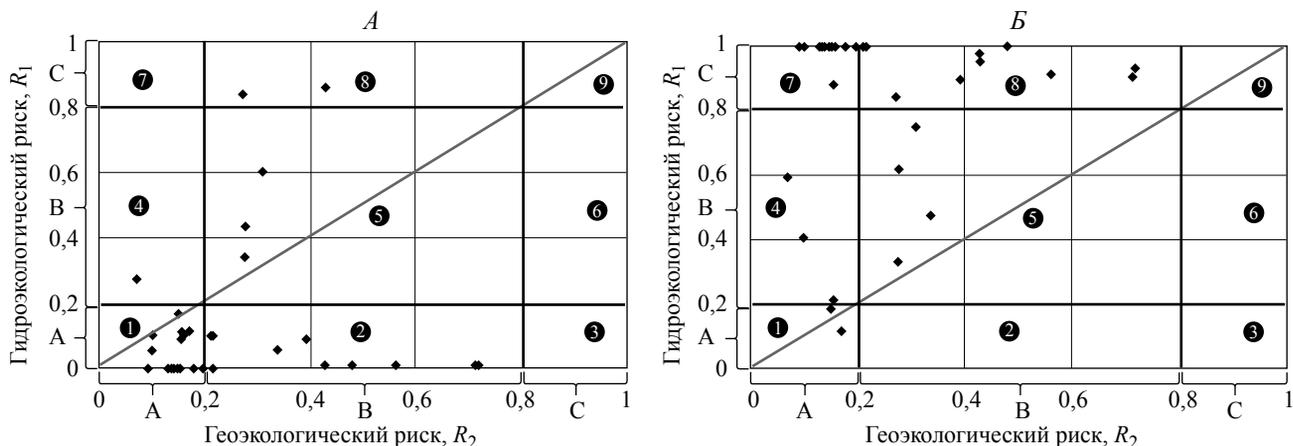


Рис. 7. Матрица составляющих гидрогеоэкологического риска для районов Керченского полуострова по сценарию: А – 1, Б – 2.

ситуация – «удовлетворительная». В 47% районов он оказывается «средний» (класс В), а ситуация – «напряженная». Двумерный анализ составляющих гидрогеоэкологического риска (рис. 7А) показал, что основная часть районов (81%) характеризуется низким уровнем гидроэкологического риска (на графике эта группа риска представлена точками соответствующих районов, лежащими ниже биссектрисы матрицы составляющих гидрогеоэкологического риска). Доля районов с удовлетворительной экологической ситуацией составляет 13%, с напряженной ситуацией – 6%. Такое распределение обусловлено особенностями современной структуры водоснабжения полуострова, представленной поверхностными и подземными источниками, а также уровнем социально-экономического развития региона.

По сценарию 2 согласно полученным данным уровень гидрогеоэкологического риска в большинстве районов (66%) Керченского полуострова характеризуется как высокий (класс С) с критической экологической ситуацией. Одна четвертая часть районов (25%) характеризуется средним риском с напряженной экологической ситуацией (класс В) и лишь 10% составляют районы с удовлетворительной ситуацией (класс А).

Сопоставление полученных оценок и анализ их соотношений (рис. 7Б) показал, что большинство (94%) административных районов полуострова в значительной степени подвержены гидроэкологическому риску (на графике эта группа риска представлена точками соответствующих районов, лежащими выше биссектрисы матрицы составляющих гидрогеоэкологического риска). Следовательно, основной фактор дестабилизации экологической ситуации в регионе в случае чрезвычайной

ситуации – дефицит воды из подземных источников водоснабжения.

Данные, полученные в ходе расчета комплексной оценки экологической ситуации при использовании подземных вод, являются исходными для проведения ранжирования районов Керченского полуострова по уровню гидрогеоэкологического риска.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная методология является инструментом геоэкологической оценки экологической ситуации на различных территориях при использовании подземных вод в качестве источника водоснабжения. Достоинства данной методологии [23]:

1. Оценка экологической ситуации при использовании подземных вод осуществляется по существенным и наиболее типичным в соответствии с региональными особенностями критериям, характеризующим степень благополучия условий проживания для населения (особенно для районов, испытывающих дефицит пресной воды): качество и дефицит воды, уровень техногенной нагрузки и плотности населения.

2. Унификация разнородных частных показателей с применением нелинейных шкалирующих функций (гауссовской и экспоненциальной сигмоиды) дает возможность сформировать систему экологических индикаторов с безразмерной шкалой оценок в интервале от 0 до 1.

3. Интеграция экологических индикаторов с использованием нелинейных весовых коэффициентов, рассчитанных с помощью экспоненциальной сигмоиды, позволяет управлять

значимостью отдельных компонент в итоговой оценке риска по степени соответствующих им экологических опасностей.

4. Пирамидальная структура интеграции от отдельных экологических индикаторов к комплексному показателю позволяет оценить экологическую ситуацию как по итоговому показателю для характеристики экологической ситуации в целом с учетом всех составляющих рисков, так и по отдельным компонентам оценки (с помощью алгоритма «обратного хода») для выявления причин ухудшения ситуации. Этот подход может быть использован на стадии формирования управленческих решений для оптимизации экологических условий проживания населения в районах, испытывающих дефицит воды.

5. Разработанный методологический подход (в части унификации и интеграции с применением нелинейных функций описанного в работе вида) может быть расширен как за счет увеличения числа экологических показателей в каждой отдельной группе, так и введением новых критериев, характеризующих определенные экологические условия с учетом региональных особенностей. Кроме того, данная методология может быть адаптирована к оценке экологических ситуаций на территориях не только при условии использования подземных вод для водоснабжения, но и при других значимых для региона экологических проблемах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арманд Д.Л. Наука о ландшафте. М.: Мысль, 1975. 288 с.
2. Бакуменко Л.П., Коротков П.А. Интегральная оценка качества и степени экологической устойчивости окружающей среды региона (на примере Республики Марий Эл) // Прикладная эконометрика. 2008. № 1(9). С. 73–92.
3. Белоусова А.П. Качество подземных вод: современные подходы к оценке. М.: Наука, 2001. 340 с.
4. Белоусова А.П. Оценка рисков загрязнения подземных вод как одной из характеристик устойчивости их качества // Водные ресурсы. 2006. Т. 33. № 2. С. 239–252.
5. Белоусова А.П., Гавич И.К., Лисенков А.Б., Попов Е.В. Экологическая гидрогеология: учебник для вузов. М.: ИКЦ «Академкнига», 2006. 397 с.
6. Боков В.А., Черванев И.Г., Поповчук Е.С. Методология и методика оценивания экологических ситуаций. Симферополь: Таврия-Плюс, 2000. 100 с.
7. Ваганов П.А., Ман-Сунг Им. Экологический риск: учебное пособие. Спб.: Изд-во СПб. университета, 2001. 116 с.
8. Галицкая И.В. Методологические исследования формирования геохимической опасности и риска на урбанизированных территориях // Геоэкология. 2007. № 3. С. 225–237.
9. Государственный комитет по водному хозяйству и мелиорации Республики Крым [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://gkvod.rk.gov.ru>.
10. Доклад о состоянии и охране окружающей среды Республики Крым за 2014 год. Симферополь: Министерство экологии и природных ресурсов Республики Крым, 2014. 230 с.
11. Доклад о состоянии и охране окружающей среды Республики Крым за 2015 год. Симферополь; ИП Бондаренко Н.Ю., 2016. 294 с.
12. Карлин Л.Н., Музалевский А.А. Экологические риски: теория и практика. Спб.: РГГМУ, 2011. 446 с.
13. Кудрик И.Д., Ошкадер А.В. Особенности оценки экологического риска при использовании подземных вод Керченского полуострова // Вестник Харьковского национального университета им. В.Н. Каразина. 2013. № 1084. С. 223–228.
14. Кудрик И.Д., Ошкадер А.В. Экомониторинг качества подземных вод Керченского полуострова // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2014. Т. 10. Вып. 2. С. 622–628.
15. Кудрик И.Д., Ошкадер А.В., Подлипенская Л.Е. Система унифицированных индикаторов как инструмент оценки экологических ситуаций прибрежных зон // Природно-ресурсный потенциал, экология и устойчивое развитие регионов России. Пенза: РИО ПГСХА, 2015. С. 44–47.
16. Осипов В.И. Оценка и управление природными рисками (состояние проблемы) // Геоэкология. 2007. № 3. С. 201–211.
17. Осипов В.И. Природные опасности и стратегические риски в мире и в России // Экология и жизнь. 2009. № 11–12. С. 5–15.
18. Ошкадер А.В. Анализ потенциальных источников загрязнения подземных вод на Керченском полуострове // Экологическая безопасность и охрана окружающей среды в регионах России: теория и практика. Волгоград: ВГУ, 2015. С. 194–197.
19. Ошкадер А.В. Методологические основы оценки экологической ситуации при использовании подземных вод // Проблемы региональной экологии. 2015. № 6. С. 97–102.
20. Ошкадер А.В. Оценка экологической ситуации на Керченском полуострове при использовании подземных вод // Проблемы региональной экологии. 2016. № 1. С. 18–25.
21. Ошкадер А.В. Экологическое состояние прибрежной зоны Керченского пролива и методические подходы к ее изучению // Экологическая стратегия развития прибрежных регионов: география, окружающая среда, население. Медико-экологические

- и социально-экономические проблемы прибрежных регионов. Ростов н/Д.: Изд-во Южного научного центра РАН, 2015. С. 158–167.
22. Ошкадер А.В., Подлипенская Л.Е. Оценка гидроэкологического риска на территории Керченского полуострова // Анализ, прогноз и управление природными рисками в современном мире. М.: РУДН, 2015. С. 286–291.
 23. Ошкадер А.В., Подлипенская Л.Е. Подходы к оценке экологической ситуации при использовании подземных источников водоснабжения // Экологическая безопасность и охрана окружающей среды в регионах России: теория и практика. Волгоград: ВГУ, 2015. С. 197–200.
 24. Ошкадер А.В., Подлипенская Л.Е. Разработка моделей количественной оценки риска при использовании подземных вод // Сергеевские чтения. Инженерная геология и геоэкология. Фундаментальные проблемы и прикладные задачи. Вып. 18. М.: РУДН, 2016. С. 183–188.
 25. Примак Е.А. Интегральная оценка устойчивости и экологического благополучия водных объектов // Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. СПб., 2009. 25 с.
 26. Природные опасности России. Оценка и управление природными рисками. Тематический том / Под ред. А.Л. Рагозина. М.: Издательская фирма «КРУК», 2003. 320 с.
 27. Природные опасности России. Природные опасности и общество. Тематический том / Под ред. В.А. Владимирова, Ю.Л. Воробьева, В.И. Осипова. М.: КРУК, 2002. 248 с.
 28. Рагозин А.Л. Общие положения оценки и управления природными рисками // Геоэкология. 1999. № 5. С. 417–429.
 29. Халов Е.А. Систематический обзор четких одномерных функций принадлежности интеллектуальных систем // Информационные технологии и вычислительные системы. 2009. № 3. С. 60–74.
 30. Швыряев А.А., Меньшиков В.В. Оценка риска воздействия загрязнения атмосферы в исследуемом регионе: учебное пособие для вузов. М.: Изд-во МГУ, 2004. 124 с.
 31. Шмаль А.Г. Факторы экологической опасности и экологические риски. Бронницы: Издательство: МП «ИКЦ БНТВ», 2010. 191 с.
 32. Яковлев В.В. Экологическая безопасность, оценка риска. СПб.: СПбГПУ, 2007. 399 с.
 33. Kevin Swingler. Applying Neural Networks. A practical Guide. Перевод Ю.П. Маслбоева. М.: Радиотехника, 2000. 664 с.
 2. Bakumenko, L.P., Korotkov, P.A. *Integral'naya otsenka kachestva i stepeni ekologicheskoi ustoichivosti okruzhayushhei sredy regiona (na primere Respubliki Marii El)* [Integral assessment of quality and ecological sustainability of the environment in region (by the example of the Mari El Republic)]. *Prikladnaya ekonometrika*, 2008, no. 1(9), pp. 73–92 (in Russian).
 3. Belousova, A.P. *Kachestvo podzemnykh vod: sovremennye podkhody k otsenke* [Groundwater quality: modern approaches to assessment]. Moscow, Nauka, 2001. 340 p. (in Russian).
 4. Belousova, A.P. *Otsenka riskov zagryazneniya podzemnykh vod kak odnoi iz kharakteristik ustoichivosti ikh kachestva* [Assessment of groundwater pollution risks as one of the characteristics of their quality sustainability]. *Vodnye resursy*, 2006, vol. 33, no 2. pp. 239–252. (in Russian).
 5. Belousova, A.P., Gavich, I.K., Lisenkov, A.B., Popov, E.V. *Ekologicheskaya gidrogeologiya: uchebnik dlya vuzov* [Ecological Hydrogeology: the textbook for higher schools]. Moscow, IKTs «Akademkniga», 2006, 397 p. (in Russian).
 6. Bokov, V.A., Chervanev, I.G., Popovchuk, E.S. *Metodologiya i metodika otsenivaniya ekologicheskikh situatsii* [Methodology and methods of estimating ecological situations]. Simferopol, Tavria-Plus, 2000, 100 p. (in Russian).
 7. Vaganov, P.A., Man-Sung, Im. *Ekologicheskii risk: uchebnoe posobie* [Ecological risk: tutorial]. St. Petersburg, Publishing St. Petersburg University, 2001. 116 p. (in Russian).
 8. Galitskaya, I.V. *Metodologicheskie issledovaniya formirovaniya geokhimicheskoi opasnosti i riska na urbanizirovannykh territoriyakh* [Methodological study in the formation of geochemical hazard and risk in urban areas]. *Geoekologiya*, 2007, no. 3, pp. 225–237 (in Russian).
 9. Gosudarstvennyi komitet po vodnomu khozyaistvu i melioratsii Respubliki Krym [State Committee for Water Resources and Land Reclamation of the Crimea Republic]. Available at: <http://gkvod.rk.gov.ru>
 10. *Doklad o sostoyanii i okhrane okruzhayushhei sredy Respubliki Krym za 2014 god* [The report on the environment state and its protection in the Crimea Republic in 2014]. Simferopol, Ministry of Ecology and Natural Resources of the Crimea Republic, 2014, 230 p. (in Russian).
 11. *Doklad o sostoyanii i okhrane okruzhayushhei sredy Respubliki Krym za 2015 god* [The report on the environment state and its protection in the Crimea Republic in 2015]. Simferopol, IP Bondarenko N. Yu., 2016, 294 p. (in Russian).
 12. Karlin, L.N., Muzalevskii, A.A. *Ekologicheskie riski: teoriya i praktika* [Ecological risks: theory and practice]. St. Petersburg, RSHMU, 2011, 446 p. (in Russian).

REFERENCES

13. Kudrik, I.D., Oshkader, A.V. *Osobennosti otsenki ekologicheskogo riska pri ispol'zovanii podzemnykh vod Kerchenskogo poluostrova* [Specifics in the environmental risk assessment upon groundwater use in the Kerch Peninsula]. *Vestnik Khar'kovskogo natsional'nogo universiteta im. V.N. Karazina*, 2013, no. 1084, pp. 223–228 (in Russian).
14. Kudrik, I.D., Oshkader, A.V. *Ekomonitoring kachestva podzemnykh vod Kerchenskogo poluostrova* [Environmental monitoring of groundwater quality in the Kerch Peninsula]. *Geopolitika i ekogeodinamika regionov*, 2014, vol.10, no. 2, pp. 622–628 (in Russian).
15. Kudrik, I.D., Oshkader, A.V., Podlipenskaya, L.E. *Sistema unifitsirovannykh indikatorov kak instrument otsenki ekologicheskikh situatsii pribrezhnykh zon* [Unified system of indicators as a tool for assessing the ecological situation of coastal areas]. *Prirodno-resursnyi potentsial, ekologiya i ustoichivoe razvitiye regionov Rossii* [Natural resource potential, ecology and sustainable development of Russian regions]. Penza, RIO PGSKHA, 2015, pp. 44–47 (in Russian).
16. Osipov, V.I. *Otsenka i upravlenie prirodnymi riskami (sostoyanie problemy)* [Assessment and management of natural risks (state-of-art)]. *Geoekologiya*, 2007, no 3. pp. 201–211. (in Russian).
17. Osipov, V.I. *Prirodnye opasnosti i strategicheskie riski v mire i v Rossii* [Natural hazards and strategic risks in the world and in Russia]. *Ekologiya i zhizn'*, 2009, no. 11–12 (96–97), pp. 5–15 (in Russian).
18. Oshkader, A.V. *Analiz potentsial'nykh istochnikov zagryazneniya podzemnykh vod na Kerchenskom poluostrove* [Analysis of potential sources of groundwater pollution in the Kerch Peninsula]. *Ekologicheskaya bezopasnost' i okhrana okruzhayushchei sredy v regionakh Rossii: teoriya i praktika* [Ecological safety and environmental protection in the regions of Russia: theory and practice]. Volgograd, VGU, 2015, pp. 194–197. (in Russian).
19. Oshkader, A.V. *Metodologicheskie osnovy otsenki ekologicheskoi situatsii pri ispol'zovanii podzemnykh vod* [Methodological framework for assessing situations during the use of groundwater]. *Problemy regional'noi ekologii*, 2015, no. 6, pp. 97–102 (in Russian).
20. Oshkader, A.V. *Otsenka ekologicheskoi situatsii na Kerchenskom poluostrove pri ispol'zovanii podzemnykh vod* [Ecological Assessment on the Kerch Peninsula during the use of groundwater]. *Problemy regional'noi ekologii*, 2016, no. 1, pp. 18–25 (in Russian).
21. Oshkader, A.V. *Ekologicheskoe sostoyanie pribrezhnoi zony Kerchenskogo proliva i metodicheskie podkhody k ee izucheniyu* [The ecological status of the Kerch strait coastal zone and methodological approaches to its study]. Environmental Strategy development of coastal areas: geography, environment, population. Medical and ecological and socio-economic problems of coastal areas. Rostov-on-Don, Izd-vo Yuzhnogo nauchnogo tsentra RAN, 2015, pp.158–167 (in Russian).
22. Oshkader, A.V., Podlipenskaya, L.E. *Otsenka gidroekologicheskogo riska na territorii Kerchenskogo poluostrova* [The hydroecological risk assessment on the Kerch peninsula]. *Materialy 9 Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "GEORISK-2015"* [Proc. 9th intern. scientific and practical conference "GEORISK-2015"]. Moscow, Izd. RUDN, 2015, pp. 286–291 (in Russian).
23. Oshkader, A.V., Podlipenskaya, L.E. *Podkhody k otsenke ekologicheskoi situatsii pri ispol'zovanii podzemnykh istochnikov vodosnabzheniya* [Approaches to environmental assessment for using groundwater sources]. *Ekologicheskaya bezopasnost' i okhrana okruzhayushchei sredy v regionakh Rossii: teoriya i praktika* [Ecological safety and environmental protection in the regions of Russia: theory and practice]. Volgograd, VGU, 2015, pp. 197–200. (in Russian).
24. Oshkader, A.V., Podlipenskaya, L.E. *Razrabotka modeli kolichestvennoi otsenki riska pri ispol'zovanii podzemnykh vod* [Development of quantitative risk assessment models using groundwater]. *Sergeevskie chteniya. Inzhenernaya geologiya i geoekologiya. Fundamental'nye problemy i prikladnye zadachi*. Proc. sci. conference in commemoration acad. E.M. Sergeev. Engineering geology and geoecology. Fundamental problems and applied tasks], 2016, pp. 183–188 (in Russian).
25. Primak, E.A. *Integral'naya otsenka ustoichivosti i ekologicheskogo blagopoluchiya vodnykh ob'ektov. Avtoref. dis. kand. geogr. nauk* [Integral assessment of sustainability and ecological safety of water facilities. Extended abstract of Cand. Sci. Diss. (Geogr.)]. St. Petersburg, 2009, 25 p. (in Russian).
26. *Prirodnye opasnosti Rossii. Otsenka i upravlenie prirodnymi riskami*. [Natural hazards in Russia. Assessment and management of natural risks]. Ragozin, A.L., Ed. Moscow, Izd. Kruk, 2003, 320 p. (in Russian).
27. *Prirodnye opasnosti Rossii. Prirodnye opasnosti i obshchestvo*. [Natural hazards in Russia. Natural hazards and society]. Vladimirov, V.A., Vorob'ev, Yu. L., Osipov, V.I. Eds, Moscow, Izd. Kruk, 2002, 248 p. (in Russian).
28. Ragozin, A.L. *Obshchie polozheniya otsenki i upravleniya prirodnymi riskami* [General provisions in assessment and management of natural risks]. *Geoekologiya*, 1999, no. 5, pp. 417–429 (in Russian).
29. Khalov, E.A. *Sistematischeskii obzor chetkikh odnomernykh funktsii prinadlezhnosti intellektual'nykh sistem* [A systematic review of precise dimensional membership functions intelligent systems]. *Informatsionnye tekhnologii i vychislitel'nye systemy*, 2009, no. 3, pp. 60–74 (in Russian).
30. Shvyryaev, A.A., Men'shikov, V.V. *Otsenka riska vozdeystviya zagryazneniya atmosfery v issleduemom regione: uchebnoe posobie dlya vuzov* [Risk assessment of the impact of air pollution in study area: tutorial for

- higher schools]. Moscow, Izd-vo MGU, 2004, 124 p. (in Russian).
31. Shmal' A.G. *Faktory ekologicheskoi opasnosti i ekologicheskie riski* [Factors of ecological hazards and ecological risks]. Bronnitsy, IKTs BNTB Izd., 2010, 191 p. (in Russian).
32. Yakovlev, V.V. *Ekologicheskaya bezopasnost', otsenka riska* [Environmental safety, risk assessment]. St. Petersburg, STU Publ., 2007, 399 p. (in Russian).
33. Kevin Swingler. *Applying Neural Networks. A practical Guide*. Translation by Yu.P. Masloboev. Moscow, Radio Engineering, 2000, 664 p.

MATHEMATICAL MODELS FOR QUANTITATIVE ASSESSMENT OF ECOLOGICAL RISK IN GROUNDWATER USE

A.V. Oshkader*, L.E. Podlipenskaya**

**Kerch State Maritime Technological University, ul. Ordzhonikidze 82, Kerch, Republic of Crimea, 298309 Russia.*

E-mail: anna_oshkader@mail.ru.

***Donbass State Technical University, pr. Lenina 16, Alchevsk, 94206 LPR.*

E-mail: lida.podlipensky@gmail.com

The article is devoted to the development of approach to the quantitative assessment of ecological risks in the areas, where groundwater sources are used for water supply (by the example of the Kerch Peninsula). The authors have analyzed the current situation in water supply in the region, they have highlighted the main problems and have revealed the strategic role of groundwater sources. The authors have substantiated the necessity to assess ecological risks associated with the use of groundwater as a source of water supply.

The process of risks estimation involved five steps: calculation of ecological indicators, harmonization of hazard degree indicators, integration of hazard degree indicators, assessment of hazard manifestation possibility and the assessment of ecological risks. The ecological situation in the contest of groundwater use was assessed according to the essential and the most common (in terms of regional features) criteria. They involve the characteristics of human living conditions, i.e., the quality and availability (scarcity) of water, the level of anthropogenic impact, and population density.

A key step in the assessment was to unify the dissimilar particular indicators using the non-linear functions, which enabled us to create a system of ecological indicators with a dimensionless scale estimates in the range from 0 to 1. The subsequent integration of ecological indicators using non-linear weighting coefficients calculated by exponential sigmoid allowed us to take into account the significance of individual components in the final risk assessment on the extent of their respective ecological hazards.

The proposed method is a tool to the geoeological assessment of situation in different areas that use groundwater as a water supply source. The main advantage of this approach is its possible expansion both by increasing the number of ecological indicators in each group and by introducing new criteria for defining the particular environmental conditions taking into account the regional specifics. In addition, this methodology can be adapted to evaluate ecological situation in the territories facing other ecological problems.

Key words: *ecological risk, groundwater, Kerch Peninsula, model evaluation, water shortage, water quality, the level of anthropogenic impact, population density, hydrogeoeological risk, unification, integration.*