

УДК 556.3 + 502.65

КАРТИРОВАНИЕ УЯЗВИМОСТИ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ТЕРРИТОРИИ ВЕРХНЕКАМСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ КАЛИЙНО-МАГНИЕВЫХ СОЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДИКИ SINTACS

¹Фетисова Н.Ф., ²Фетисов В.В., ³Де Майо М.¹Горный институт УрО РАН, Пермь, e-mail: fetisova@mi-perm.ru;²Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь;³Политехнический университет, Турин, Италия

Отходы калийных предприятий Верхнекамского месторождения калийно-магниевого солей, складываемые на земной поверхности в солеотвалах и шламохранилищах, выступают источником засоления подземных вод основных гидрогеологических подразделений (шешминского терригенного комплекса и соликамской терригенно-карбонатной свиты), в которых сосредоточены практически все ресурсы пресных подземных вод надсолевой толщи пород. Подземные воды территории, преимущественно пресные гидрокарбонатно-кальциевые, вблизи накопителей солеотходов приобретают хлоридно-натриевый состав. Выполненная в настоящем исследовании оценка уязвимости и подготовленная карта уязвимости подземных вод представляют собой инструмент для выделения участков, наиболее подверженных загрязнению. Карта уязвимости подземных вод к загрязнению подготовлена на основе известной за рубежом методики SINTACS, которая учитывает параметрические весовые и рейтинговые значения ряда факторов уязвимости. В настоящей работе рассмотрены особенности построения карты уязвимости на основе вышеуказанной методики с учетом специфики природных условий территории исследований.

Ключевые слова: Верхнекамское месторождение калийно-магниевого солей, уязвимость, подземные воды, SINTACS, зона аэрации

VULNERABILITY MAPPING OF SHALLOW GROUNDWATER USING SINTACS MODEL IN THE AREA OF THE UPPER KAMA POTASSIUM SALT DEPOSIT

¹Fetisova N.F., ²Fetisov V.V., ³De Maio M.¹Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
Perm, e-mail: fetisova@mi-perm.ru;²Perm State National Research University, Perm;³Politecnico di Torino, Turin, Italy

Wastes of potash industry stored at the ground surface in salt dumps and sludge storages are source of salinization of groundwater and surface water. The main hydrogeological subdivisions, in which the most part of groundwater resources is concentrated, are the water-bearing Solikamskaya terrigenous-carbonate subsuite and Sheshminsky terrigenous complex. The shallow aquifers on this area contain fresh water of hydrocarbonate calcium composition that is the normal background for the area. Near the sludge-storage groundwater acquire sodium chloride composition. Performed in the present study, vulnerability assessment and prepared map of groundwater vulnerability present a tool to determine areas where groundwater is most vulnerable to contamination. The map of groundwater vulnerability was prepared using one of the well-known abroad groundwater vulnerability mapping method SINTACS which takes into account parametric weights and rating values of a number of factors of vulnerabilities. In the paper, some features of vulnerability mapping based on the above mentioned method with taking into account the specificity of the natural conditions of the study area are presented.

Keywords: Upper Kama potassium salt deposit, vulnerability, groundwater, SINTACS-model, unsaturated zone

Березниковско-Соликамский промышленный район характеризуется широким развитием предприятий химической промышленности, в большей части связанных с разработкой Верхнекамского месторождения калийно-магниевого солей (ВКМКС). Разработка месторождения ведется шахтным способом, глубина шахт изменяется от 100 до 500 м. На месторождении добываются сильвинит, карналлит, галит и рассолы. Содержание сильвина в руде изменяется от 25 до 32%, оставшаяся часть 60–75% приходится на галит и нерастворимый остаток (глина, карбонатные частицы), содержание которого в различных частях месторождения варьи-

рует от 1,5 до 6,5% (9%). После обогащения (флотации) калийного сырья твердые галитовые отходы (80–93%) размещаются в солеотвалах, а глинисто-солевые шламы (7–10%) – в шламохранилищах. По своему составу и расположению они представляют собой основной источник засоления подземных и поверхностных вод, почв и горных пород. На участках сосредоточения жидких отходов (шламохранилища и рассолосборники) имеют место интенсивные утечки высокоминерализованных рассолов, приводящие к изменению химического состава подземных вод и к снижению их качества. Таким образом, для территории ВКМКС риск загрязнения подземных вод

весьма высок, поэтому оценка их уязвимости является актуальной задачей.

Общая характеристика района исследований. Территория исследований площадью около 2500 км² охватывает центральную часть ВКМКС в пределах разрабатываемых и перспективных участков. Ограничена на севере р. Боровая, на юге – р. Яйва, западной границей является р. Кама. На рассматриваемой территории расположены два крупных города, Березники и Соликамск, с общей численностью жителей около 250 тыс. человек и ряд более мелких населенных пунктов. Для водоснабжения используется несколько крупных водозаборов подземных вод и множество водозаборных скважин.

Геологический разрез сверху вниз представлен четвертичными отложениями, залегающими на породах уфимского и кунгурского яруса нижней перми. Галогенная формация в основном связана с породами кунгурского яруса. Надсолевой комплекс пород ВКМКС занимает верхний гидрогеологический этаж [9], нижней границей которого является кровля отложений березниковской свиты, играющей роль регионального водоупора, а верхней – поверхность земли. Подземные воды этажа приурочены к нижнепермским и отчасти к четвертичным и палеоген-неогеновым отложениям.

Основными гидрогеологическими подразделениями, в которых сосредоточены практически все ресурсы пресных подземных вод надсолевой толщи пород, являются водоносная соликамская терригенно-карбонатная свита и слабоводоносный локально-водоносный шешминский терригенный комплекс [9]. Остальные подразделения на месторождении не имеют широкого распространения.

Материалы и методы исследования

Концепция уязвимости подземных вод основана на допущении, что геологическая среда может обеспечивать некоторую степень защиты подземных вод от природного и техногенного негативного воздействия. Термин «уязвимость подземных вод к загрязнению» был введен французским гидрогеологом Дж. Марга в конце 1960-х годов [12]. В России и странах СНГ широко распространенным является понятие «защищенность» подземных вод, под которой, согласно В.М. Гольдбергу [4], понимается их

перекрытость отложениями, препятствующими проникновению загрязняющих веществ с поверхности земли или из вышележащего водоносного горизонта. Понятие защищенность является обратным понятию «уязвимость». Чем больше защищенность подземных вод, тем меньше их уязвимость к загрязнению [5].

В отечественной практике наибольшую известность получила методика качественной оценки защищенности подземных вод от загрязнения, разработанная во ВСЕГИНГЕО под руководством В.М. Гольдберга [4]. Качественная оценка защищенности основывается на природных факторах (учитываются литологический состав и мощность слабопроницаемых отложений в зоне аэрации, глубина залегания подземных вод) и производится по сумме условных баллов. На основе методики ВСЕГИНГЕО качественная оценка защищенности была выполнена Е.А. Иконниковым [7] для территории Пермского Прикамья, Г.В. Бельтюковым [3] для территории ВКМКС. Несмотря на широкое применение указанной методики, наряду с преимуществами отмечаются и ее недостатки [1, 2] (в частности, неучет величины инфильтрационного питания и влияния процессов сорбции). Кроме того, методика рассматривает ограниченное количество типов грунтов и горных пород, что затрудняет выполнение оценки защищенности территории исследований, где наряду с четвертичными отложениями в строении зоны аэрации принимают участие коренные породы.

В настоящей работе для рассматриваемой территории выполнена среднемасштабная оценка уязвимости подземных вод на основе метода «SINTACS» [11]. Акроним произошел от итальянских названий учитываемых параметров: S – глубина залегания подземных вод (Soggiacenza); I – инфильтрационное питание (Infiltrazione); N – зона аэрации или ненасыщенная зона (Non saturo); T – тип почв (Tipologia della copertura); A – характеристика водоносного горизонта (Acquifero); C – коэффициент фильтрации (Conducibilita); S – топографическая поверхность (Superficie topografica).

Все параметры подразделяются на интервалы значений или установленные типы. Каждому интервалу (типу) присваивается рейтинг от 1 до 10 в зависимости от его влияния на уязвимость (10 – характеризует наибольшую уязвимость). Рейтинговое значение каждого параметра умножается на весовой коэффициент, под которым понимается некоторое значение, определяющее существующие условия, которые могут усиливать влияние каждого параметра. Весовой коэффициент определяется для каждого параметра, его значение изменяется от 1 до 5 («5» рассматривается как наиболее значимый в отношении потенциальной возможности загрязнения, а «1» – как наименее значимый. SINTACS имеет несколько наборов весовых коэффициентов (табл. 1).

Конечный индекс уязвимости (SINTACS индикатор) определяется по следующей формуле:

$$I_{SINTACS} = S_r S_w + I I_w + N_r N_w + T_r T_w + A_r A_w + C_r C_w + S_r S_w, \quad (1)$$

где S, I, N, T, A, C и S – параметры; r – рейтинг; w – весовой коэффициент, присвоенный каждому параметру.

Значение индекса естественной уязвимости показывает потенциальную возможность загрязнения водоносного горизонта. Чем больше его значение, тем больше потенциальная возможность загрязнения подземных вод. Полученные значения изменяются от

26 до 226. Индекс уязвимости нормализуется с помощью следующей формулы:

$$I_n = 100(Ix - I_{min}) / (I_{max} - I_{min}), \quad (2)$$

где I_n – нормализованный индекс уязвимости; I_{min} – минимальный индекс уязвимости, I_{max} – максимальный

индекс уязвимости и I_x – ненормализованный индекс уязвимости. Таким образом, карта уязвимости по

SINTACS имеет шкалу от 0 до 100. В оригинальном методе используется 6 степеней уязвимости.

Таблица 1

Наборы весовых коэффициентов по методу SINTACS

Параметр	Нормальное воздействие	Значительное воздействие	Дренаж	Карст	Трещиноватость	Нитраты
S	5	5	4	2	3	5
I	4	5	4	5	3	5
N	5	4	4	1	3	4
T	3	5	2	3	4	5
A	3	3	5	5	4	2
C	3	2	5	5	5	2
S	3	2	2	5	4	3

Результаты исследования и их обсуждение

Для построения карты уязвимости подземных вод были выполнены анализ и систематизация фондовых и опубликованных работ; оцифровка и геокодирование данных, характеризующих факторы (параметры) уязвимости подземных вод; подготовлены базы геоданных и карты рассматриваемых параметров, выполнена их дальнейшая обработка средствами ГИС.

Базовым масштабом исходных карт, отражающих природные факторы уязвимости, являлись съемки масштаба 1:100000 и 1:200000, что соответствует среднемасштабной оценке уязвимости подземных вод от загрязнения [2].

Расчеты были выполнены средствами геоинформационной системы ArcGIS с применением модуля Spatial Analyst. Размер

ячеек растров (карт расчетных параметров) принимался равным 50×50 м, для некоторых – 100×100 м. При интерполяции данных использовался метод Кригинга с линейной вариограммой.

Карта глубин залегания подземных вод подготовлена с учетом схемы гидроизогиПС и топографической основы (высотных отметок территории). Для удобства ранжирования глубин залегания подземных вод было составлено уравнение аппроксимации (рис. 1), соответствующее графику исходной методики [11]. Интервалы глубин и соответствующий рейтинг по SINTACS представлен в табл. 2. Схема ранжирования глубин залегания подземных вод с учетом SINTACS представлена на рис. 2 (а). Преобладающими значениями рейтинга являются «2» и «3» (глубины залегания от 19,50 до 60 м) и «10» (глубины залегания менее 1 м).

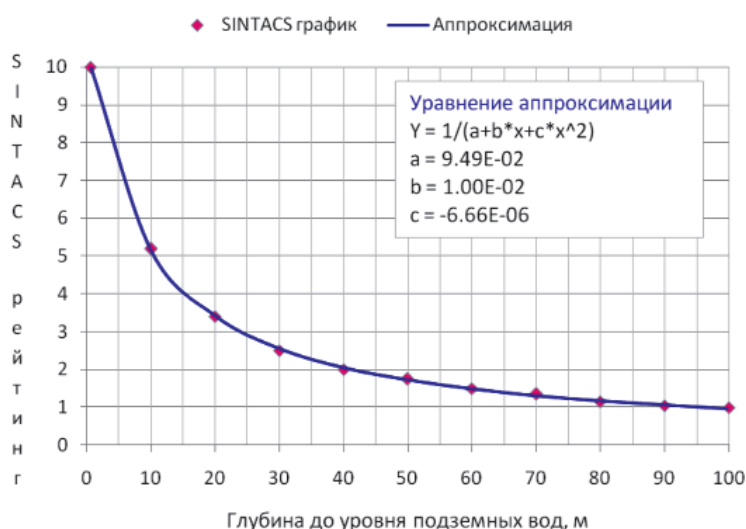


Рис. 1. График определения рейтинга SINTACS в зависимости от глубины залегания подземных вод

Таблица 2
Интервалы глубин залегания подземных вод и рейтинг SINTACS

Глубина до уровня подземных вод, м	Рейтинг на основе уравнения аппроксимации	Интервалы глубин до уровня подземных вод	SINTACS рейтинг
0,50	10	< 1,05	10
1,05	9,49	1,05–2,30	9
2,30	8,48	2,30–3,85	8
3,85	7,49	3,85–5,95	7
5,95	6,48	5,95–8,75	6
8,75	5,49	8,75–12,85	5
12,85	4,49	12,85–19,50	4
19,50	3,47	19,50–31,20	3
31,20	2,49	31,20–60,00	2
60	1,49	> 60	1

Карта значений инфильтрационного питания составлена с учетом карты модулей подземного стока [10], поскольку величина инфильтрационного питания подземных вод связана с модулем подземного стока выражением

$$W = 31,54 \cdot M; \quad (3)$$

где W – величина инфильтрационного питания (мм/год); M – модуль подземного стока (л/с×км²); 31,54 – коэффициент, учитывающий размерность входящих в уравнение параметров.

Площадное распределение участков с различной величиной инфильтрации представлено на рис. 2 (б). При оценке уязвимости в данной работе учитывались максимальные значения величины инфильтрации. Преобладающие значения рейтинга для исследуемой территории составляют «3» и «7» с величиной инфильтрации соответственно 63 и 158 мм/год.

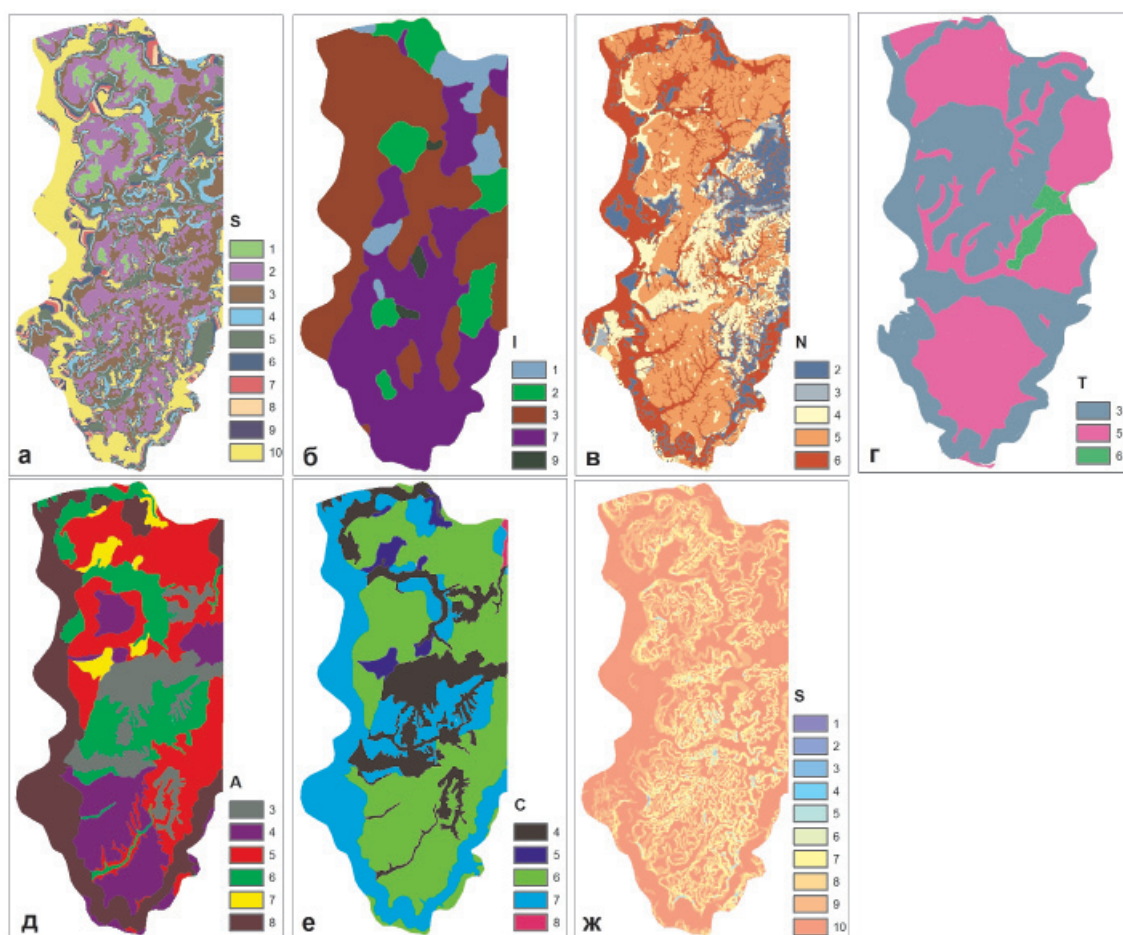


Рис. 2. Карты параметров, ранжированных в соответствии с рейтингом SINTACS: а – S – глубина залегания подземных вод; б – I – инфильтрационное питание; в – N – зона аэрации; г – T – тип почв; д – A – характеристика водоносного горизонта; е – C – коэффициент фильтрации; ж – S – топографическая поверхность

Зона аэрации на рассматриваемой территории имеет в основном двухслойное строение. Первый слой представлен различными по генезису четвертичными образованиями (биогенными, аллювиальными отложениями первой, второй и третьей надпойменных террас, делювиальными, флювиогляциальными, элювиально-делювиальными, озерными, гляциальными, техногенными отложениями), второй слой – коренными породами уфимского яруса нижней перми.

На основе данных геологического описания около 400 скважин (детальной разведки, структурных, гидрогеологических, инженерно-геологических) была построена карта мощности четвертичных образований. С учетом известной глубины залегания подземных вод (или мощности зоны аэрации) были подготовлены карты мощности четвертичных отложений в зоне аэрации и мощности пермских отложений в зоне аэрации. Примерно на 40% территории зона аэрации

имеет однослойное строение, представленное только четвертичными отложениями. При оценке уязвимости по методу SINTACS параметр «N», учитывающий влияние зоны аэрации, был определен как средневзвешенный по мощности (рис. 2 (в)).

Характеристика почв. В соответствии с почвенной картой Пермской области (1989), на исследуемой территории представлены аллювиальные, дерново-среднеподзолистые, дерново-сильноподзолистые, сильноподзолистые и среднеподзолистые почвы, смытые и намытые почвы оврагов, балок, пойм мелких рек и прилегающих склонов. На территории исследований наиболее распространены сильно-подзолистые и дерново-сильноподзолистые типы почв (табл. 3). Для ранжирования выполнено сопоставление разных типов почв по классификации Качинского с треугольником Ферре. Распространение типов почв в соответствии с рейтингом SINTACS представлено на рис. 2 (г).

Таблица 3

Типы почв и рейтинг SINTACS

Тип почв	Преобладающий механический состав	Классификация Н.А. Качинского	Треугольник Ферре	SINTACS рейтинг
Аллювиальные	тяжелый суглинок	тяжелосуглинистые (40–50% глины)	clay loam	3
Дерново-средне-подзолистые	тяжелый суглинок	тяжелосуглинистые (40–50% глины)	clay loam	3
Дерново-сильно-подзолистые	тяжелый суглинок	тяжелосуглинистые (40–50% глины)	clay loam	3
Сильноподзолистые	средний суглинок	среднесуглинистые (30–40% глины)	sandy lay loam	5
Смытые и намытые почвы оврагов, балок, пойм мелких рек и прилегающих склонов	суглинок и песчаный суглинок	среднесуглинистые (30–40% глины)	sandy clay loam	5
Среднеподзолистые	песчаный суглинок	супесчаные (10–20% глины)	loamy sand	6

Характеристика водоносного горизонта (на основе преобладающего литологического состава водовмещающих пород) и диапазон значений **коэффициента фильтрации**, а также ранжирование данных параметров по методике SINTACS представлено в табл. 4 и на рис. 2 (д, е). Преобладающими значениями коэффициента фильтрации являются значения от 5 до 10 м/сут. Карты усредненных значений коэффициентов фильтрации четвертичных отложений и коренных нижнепермских пород территории исследований подготовлены на основе обобщения данных фондовых материалов [8, 10]. Границы распространения литологических разно-

стей были приняты в соответствии с картами М 1:100000 (четвертичных отложений и геологической) [10].

Рельеф является важным фактором, влияющим на величину подземного питания, направление и скорость движения подземных вод [6]. Территория исследований относится к району денудационной равнины Предуралья и представляет собой холмистую равнину, дренированную многочисленными водотоками разного порядка [8]. Преобладающие значения уклона территории находятся в диапазоне 0–2%, что соответствует значению «10» рейтинга SINTACS (рис. 2 (ж)).

Таблица 4

Характеристика водовмещающих пород и рейтинг SINTACS

Геологический индекс	Описание водовмещающих пород	K _ф (ср. знач.), м/сут	K _ф (ср. знач.), см/сут	Рейтинг SINTACS	
				Характеристика водоносного горизонта	Коэффициент фильтрации
a Q	аллювиальные отложения малых рек	0,5	7,87E-06	6 (средне- и мелкозернистые аллювиальные отложения)	4
a Q	аллювиальные отложения р. Кама и Яйва	10	1,57E-04	8 (крупнозернистые аллювиальные отложения)	7
f Q el	флювиогляциальные отложения	2,5	3,94E-05	7 (песчаный комплекс)	5
P ₁ ss	шешминские отложения с глинистым типом разреза, преобладание алевролитов	0,5	7,87E-06	3 (алевролит, песчаник)	4
P ₁ ss	шешминские отложения с песчаным типом разреза	5	7,87E-05	4 (песчаник)	6
P ₁ sl ₂	верхнесоликамские отложения, мергелисто-известняковый разрез	5	7,87E-05	5 (мергель, известняк)	6
		10	1,57E-04	6 (трещиноватый известняк)	7
P ₁ sl ₂	верхнесоликамские отложения, известняковый разрез	20	3,15E-04	8 (трещиноватый известняк)	7
		50	7,87E-04	8 (трещиноватый известняк)	8
P ₁ sl ₁	нижнесоликамские отложения	5	7,87E-05	4 (мергель, известняк)	6

Согласно методике, для определения весового коэффициента, на территории были выделены участки с различной по степени интенсивности антропогенной нагрузкой и различными физико-географическими особенностями территории. Таким образом, разрабатываемые участки месторождения солей и нефтяные месторождения были определены как зоны с высокой антропогенной нагрузкой. Речная сеть (р. Кама с ее основными притоками), включая буферную зону, характеризующуюся распространением аллювиального водоносного горизонта, определена как дренажная зона. Оставшаяся часть была рассмотрена как территория с невысокой или нормальной антропогенной нагрузкой.

Весовые коэффициенты для всех рассматриваемых параметрических слоев были присвоены согласно таблице.

На следующем этапе был рассчитан индекс уязвимости (формула (1)) и выполнено финальное ранжирование индекса уязвимости (формула (2)). Итоговая карта уязвимости подземных вод по методу SINTACS представлена на рис. 3.

Как видно из диаграммы под рисунком, на исследуемой территории преобладают участки со средней и высокой уязвимостью подземных вод. Наиболее уязвимые участки с экстремально высокой и высокой уязвимостью почти полностью находятся в долинах р. Кама и ее крупнейшего притока на данной территории – р. Яйва.

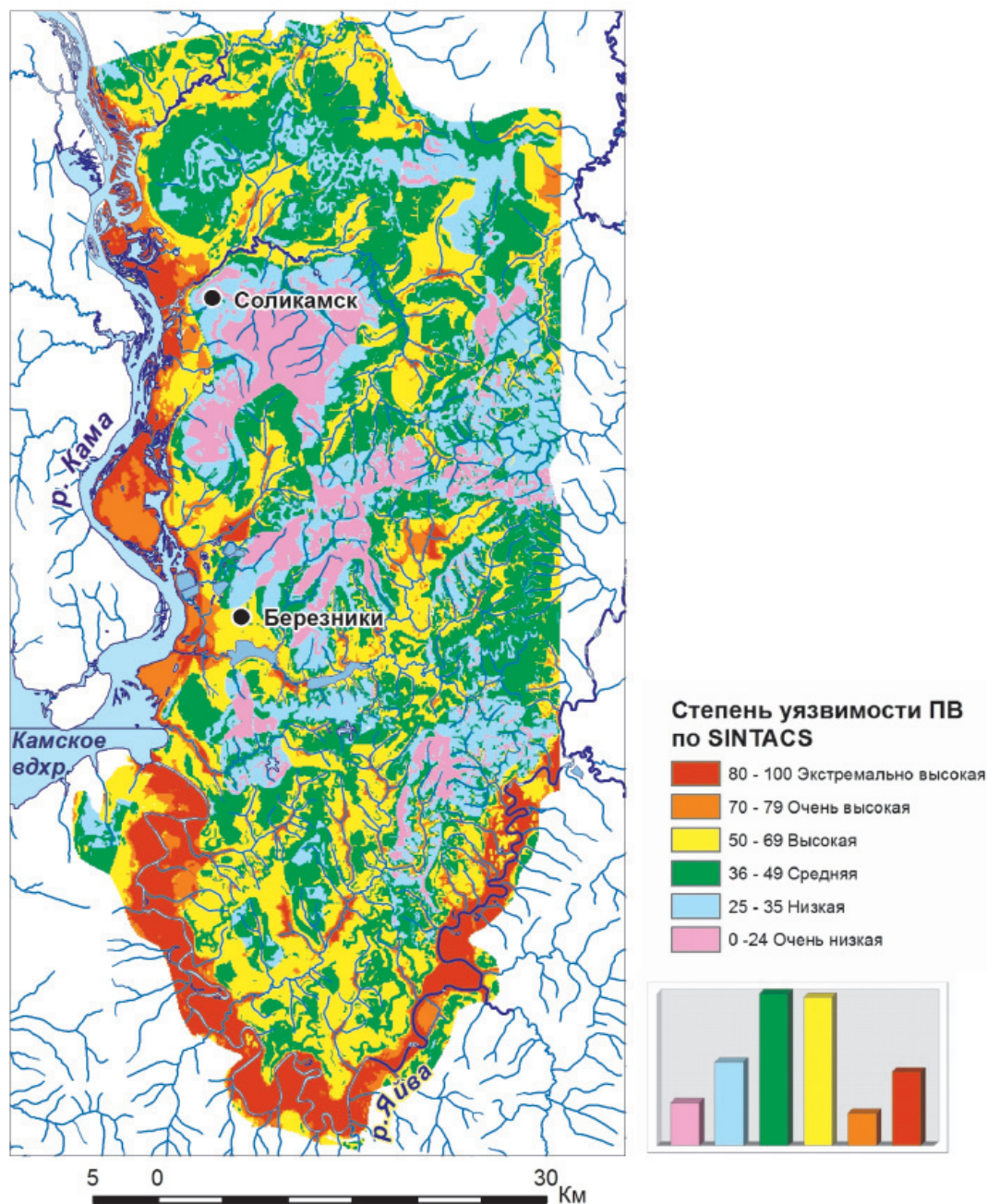


Рис. 3. Карта уязвимости подземных вод территории ВКМКС, подготовленная на основе методики SINTACS

Результаты исследований предлагают новую основу при планировании мер защиты от загрязнения подземных вод, а также могут выступать базой для дальнейших методологических исследований применительно к конкретным участкам территории более крупного масштаба.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства образования Пермского края (научный проект МИГ № С-26/208).

Список литературы

1. Белоусова А.П. Основные принципы и рекомендации по оценке и картированию защищенности подземных вод от загрязнения // Водные ресурсы. – 2003. – Т. 30. № 6. – С. 667–677.
2. Белоусова А.П. Экологическая гидрогеология: учебник для вузов / А.П. Белоусова, И.К. Гавич, А.Б. Лисенков, Е.В. Попов. – М.: Академкнига, 2007. – 396 с.
3. Бельтюков Г.В. Карстовые и гипергенные процессы в эвапоритах: Автореф. дис. д-ра геол.-мин. наук. – Пермь, 2000. – 40 с.
4. Гольдберг В.М. Взаимосвязь загрязнения подземных вод и природной среды. – Л.: Гидрометеониздат, 1987. – 247 с.

5. Зекцер И.С. Подземные воды мира как компонент окружающей среды. – М.: Научный мир, 2001. – 328 с.
6. Зекцер И.С. Подземные воды Мира: ресурсы, использование, прогнозы. – М.: Наука, 2007. – С. 127–135.
7. Иконников Е.А. Природная защищенность подземных вод Пермского Прикамья от поверхностного загрязнения // Гидрогеология и карстование: Межвуз. сб. науч. тр. / Перм. ун-т. Пермь, 2002. – Вып. 14. – С. 132–137.
8. Комплексная гидрогеологическая и инженерно-геологическая съемка масштаба 1:50000 Верхнекамской площади на территории действующих горнодобывающих предприятий и детально разведанных участков (информационный отчет): отчет о НИР / Западуралгидрогеология; отв. исп. В.А. Балдин. – Сылва, 1998.
9. Кудряшов А.И., Васюков В.Е., Фон-дер-Флаасс Г.С. и др. Разрывная тектоника Верхнекамского месторождения солей / под науч. ред. А.И. Кудряшова. – Пермь: ГИ УрО РАН, 2004. – 194 с.
10. Создание сводных геологической и гидрогеологической карт Верхнекамского месторождения калийных солей масштаба 1:100000 / ФГУП «Геокарта-Пермь»; отв. исп. Т.В. Харитонов. – Пермь, 2002.
11. Civita M., De Maio M. A new parametric system for the assessment and automatic mapping of groundwater vulnerability to contamination SINTACS R5 / Pitagora Editor, Bologna, 2000. – 226 pp.
12. Margat J. Vulnérabilité de nappes d'eau souterraine à la pollution [Groundwater vulnerability to contamination]. Bases de la cartographie. – Orléans: BRGM, 1968.

References

1. Belousova A.P. Osnovnye printsipy i rekomendatsii po otsenke i kartirovaniyu zashchishchennosti pozemnykh vod ot zagryazneniya // Vodnye resursy. 2003. Vol. 30. no. 6, pp. 667–677.
2. Belousova A.P. Ekologicheskaya gidrogeologiya: Uchebnyk dlya vuzov / A.P. Belousova, I.K. Gavich, A.B. Lisenkova, E.V. Popov. M.: Akademkniga, 2007. 396 p.
3. Belyukov G.V. Karstovye i gipergennye protsessy v evaporitakh: Avtoref. dis. d-ra geol.-min. nauk. Perm, 2000. 40 p.
4. Goldberg V.M. Vzaimosvyaz' zagryazneniya podzemnykh vod i prirodnoi sredy. L.: Gidrometeoizdat, 1987. 247 p.

5. Zektser I.S. Podzemnye vody mira kak komponent okruzhayushchei sredy. M.: Nauchnyi mir, 2001. 328 p.
6. Zektser I.S. Podzemnye vody Mira: resursy, ispol'zovanie, prognozy. M.: Nauka, 2007, pp. 127–135.
7. Ikonnikov E.A. Prirodnaya zashchishchennost' podzemnykh vod Permskogo Prikam'ya ot poverkhnostnogo zagryazneniya // Gidrogeologiya i karstovedenie: Mezhdvuz. sb. nauch. tr. / Perm. un-t. Perm, 2002. no. 14, pp. 132–137.
8. Kompleksnaya gidrogeologicheskaya i inzhenerno-geologicheskaya s'emka masshtaba 1:50000 Verkhnekamskoi ploschadi na territorii deistvuyushchikh gornodobyvayushchikh predpriyatii i detal'no razvedannykh uchastkov (informatcionnyi otchet): otchet o NIR / Zapaduralgidrogeologiya; отв. isp. V.A. Baldin. Sylva, 1998.
9. Kudryashov A.I., Vasyukov V.E., Fon-der-Flaass G.S. i dr. Razryvnaya tektonika Verkhnekamskogo mestorozhdeniya solei / Pod nauch. red. A.I. Kudryashova. Perm: GI UrO RAN, 2004. 194 p.
10. Sozdanie svodnykh geologicheskoi i gidrogeologicheskoi kart Verkhnekamskogo mestorozhdeniya kaliinykh solei masshtaba 1:100000 / FGUP «Geokarta-Perm»; отв. isp. T.V. Kharitonov. Perm, 2002.
11. Civita M., De Maio M. A new parametric system for the assessment and automatic mapping of groundwater vulnerability to contamination SINTACS R5 / Pitagora Editor, Bologna, 2000. 226 p.
12. Margat J. Vulnérabilité de nappes d'eau souterraine à la pollution [Groundwater vulnerability to contamination]. Bases de la cartographie. Orléans: BRGM, 1968.

Рецензенты:

Гаев А.Я., д.г.-м.н., профессор, директор Института экологических проблем гидросферы, Оренбургский государственный университет, г. Оренбург;

Семячков А.И., д.г.-м.н., профессор, заведующий кафедрой геоэкологии, Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург.

Работа поступила в редакцию 26.08.2014.