

ГОРНАЯ ИНФОРМАТИКА

УДК 502/504

ИССЛЕДОВАНИЕ РАЙОНОВ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД НА ОСНОВЕ GIS-ИНТЕГРИРОВАННОЙ МЕТОДИКИ КАРТИРОВАНИЯ УЯЗВИМОСТЕЙ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ОТ ИСТОЧНИКОВ ЗАГРЯЗНЕНИЯ

Д. Шимшек¹, М. Куруоглу², З. Демиркыран¹

¹Университет Девятого сентября, филиал в г. Торбалы,
E-mail: celalettin@deu.edu.tr, zulfu.demirkiran@deu.edu.tr, 35860, г. Измир, Турция

²Университет Девятого сентября, филиал в г. Тыназтепе,
E-mail: mehmet.kuruoglu@deu.edu.tr, 35390, г. Измир, Турция

На основе GIS-интегрированной технологии картирования уязвимостей разработана методика определения высокопродуктивных подземных водоносных районов и дана оценка возможности их защиты от антропогенных источников загрязнения. Методика реализована на примере водоносного потенциала бассейна р. Малый Мендерес (Турция), в котором наряду с сельскохозяйственными угодьями расположены крупные промышленные предприятия и гражданские объекты. Показано, что восточная часть бассейна, обладающая низким водоносным потенциалом, используется для сельскохозяйственных целей. Западная часть обладает высоким водоносным потенциалом, который используется преимущественно для нужд населенных пунктов и промышленных предприятий. Это означает, что региональные водные ресурсы подвергаются повышенному риску загрязнения при расширении городов и развитии промышленности. Решена задача по определению нуждающихся в защите районов в основной водоносной системе, что способствует оптимальному планированию землепользования в пределах рассмотренного бассейна.

Водоносный потенциал, водоносная система, защита подземных вод, планирование землепользования, географические информационные системы

DOI: 10.15372/FTPRPI20220214

На территории Турции в пределах высокопродуктивных речных бассейнов используется большое количество поверхностных водоносных систем для сельскохозяйственных, городских и промышленных целей. В стране в особо значимых водоносных районах расположены промышленные предприятия и крупные населенные пункты. В отдельных местах водоносных районов возникают свалки бытовых отходов. Из-за продвижения промышленных и городских областей на свободные аллювиальные водоносные системы снизилось качество и количество запасов подземных вод [1–3]. В качестве примера можно рассмотреть ситуацию, связанную с загрязнением подземных вод нитратами в г. Эскишехир, где большая часть потребности в водных ресурсах удовлетворяется за счет работы водяных скважин на территории города [1]. Можно отметить и другие страны мира (Нигерия), где из-за городских и промышленных сточ-

ных вод, а также сельскохозяйственной деятельности произошло загрязнение подземных вод в аллювиальной водоносной системе бассейна р. Вари [4]. Данная ситуация нанесла значительный ущерб запасам подземных вод в указанном регионе.

В последние годы правительство Турции осуществляет попытки определить границы высокопродуктивных водоносных районов во всех речных бассейнах для их эффективного управления. Составлены законодательные акты по защите районов, которые широко используются в качестве источника питьевой и ирригационной воды [5]. Так, организацией State Hydraulic Works (DSI) разработан план по управлению подземными водными ресурсами всех речных бассейнов Турции. Всего на территории страны находятся 25 речных бассейнов, где большая часть региональных водоносных систем испытывает экологическую нагрузку из-за большого потребления промышленными и городскими объектами. Подобные продуктивные водоносные системы во многих бассейнах нуждаются в превентивных мерах по долгосрочной защите водных ресурсов.

Установление районов защиты продуктивных подземных вод требует наличия карт водоносных систем, которые наиболее уязвимы к загрязнению. Понимание уязвимости подземных вод в городских водоразделах крайне важно для предотвращения загрязнения как поверхностных, так и подземных водных ресурсов. Оно также необходимо для планирования землепользования и развития территорий [6]. Предварительное планирование землепользования — эффективный способ снижения потенциального загрязнения запасов подземных вод [7]. Разработки GIS позволили использовать новую технологию, известную как картирование уязвимостей, в основе которой лежит анализ чувствительности подземных вод к загрязнению с учетом гидрогеологических параметров. Одной из наиболее широко применяемых моделей картирования уязвимостей служит модель DRASTIC, разработанная для защиты окружающей среды на территории США [8]. Такие модели, как GOD, SINTACS и CALOD, используют простые в освоении инструменты для анализа уязвимости водоносной системы к загрязнению [9–12]. Для определения потенциала различных водоносных систем, обладающих уникальными водными запасами, применяется метод индексации уязвимостей [13–16]. Некоторые работы выполнены с целью определения водоносного потенциала в полузасушливых и засушливых регионах или речных бассейнах, в которых основной экологической проблемой является ирригация минерализованной водой [17, 18].

Цель настоящей работы — составление карты водоносного потенциала с помощью GIS-интегрированной технологии индексации уязвимостей и оценка стратегий по защите высокопродуктивных водоносных районов в бассейне р. Малый Мендерес (БРММ). Разработанный метод может стать эффективным инструментом для понимания потенциальной продуктивности региональных водоносных систем с целью их защиты от источников загрязнения.

КЛЮЧЕВЫЕ ПАРАМЕТРЫ И МЕТОДОЛОГИЯ

Запасы подземных вод легко классифицируются с помощью современных компьютерных технологий. Методами индексации определяются такие параметры, как качество воды, уязвимость водоносного горизонта, область защиты водоносного горизонта, коэффициенты пополнения и потребления подземных вод [19–23]. С помощью методов классификации можно объяснить и решить многие значимые проблемы, связанные с подземными водами. Для защиты областей добычи правовое регулирование водных ресурсов разделено на первый и второй класс качества. В области добычи подземных вод запрещена промышленная деятельность, организация жилых районов и свалка бытовых отходов. Тем не менее промышленные и городские образования начали значительно расширяться на аллювиальные районы, обеспечивающие запасы подземных вод из водоносных горизонтов.

В пределах западной береговой линии Эгейского региона на территории Турции располагается множество грабенов, покрытых аллювиальными породами. Эти грабены богаты запасами подземных и поверхностных вод, к ним можно отнести бассейны рек Большой Мендерес, Малый Мендерес и Гедиз.

В качестве рассматриваемой области исследован бассейн р. Малый Мендерес (БРММ), который обладает значительным водоносным потенциалом. Для планирования развития бассейна требуется детализированная база данных, собранная в [24–26]. На основе этой базы данных в GIS составлено множество топографических карт в цифровом виде, а также геологические, гидрогеологические, морфологические и климатические карты. Карта водоносного потенциала включает следующие параметры: мощность водоносного горизонта, гидропроводность, удельная продуктивность, коэффициент пополнения, литологическая структура горизонта и глубина до уровня подземных вод.

Мощность водоносного горизонта имеет большое значение, так как влияет на изменение объема запасов подземных вод, доступных к добыче. Она важна при определении районов с водоносным потенциалом и напрямую влияет на параметры добычи подземных вод. Карта мощности основного водного горизонта необходима для составления карты водоносного потенциала, который определяется на основе данных, полученных от множества водяных скважин.

Удельная продуктивность — важный параметр для определения характеристик аллювиальной водоносной системы, который влияет на производительность скважины и позволяет оценить потенциал гидропроводности горизонта [27, 28]. Удельная продуктивность выражается отношением производительности скважины к водопонижению и вычисляется на основе разницы между статическим и динамическим водным горизонтом после насосных испытаний. Удельная продуктивность зависит от мощности и литологической структуры водоносного горизонта. Высокопористые водоносные горизонты, состоящие из крупнозернистых грунтов (гравий, песок), обладают большей удельной продуктивностью по сравнению с мелкозернистыми грунтами, такими как алевриты и глины.

Одна часть объема выпадающих осадков в гидрогеологической системе приходится на поверхностный водосток, другая часть теряется при испарении, а оставшаяся проникает в водоносную систему. Этот процесс получил название пополнение водоносного горизонта [29]. Пополнение представляет собой разницу между общим объемом выпадающих осадков и совокупными потерями, приходящимися на водосток и испарение. После того как вода, проникающая в водоносную систему, достигнет уровня подземных вод, она начинает двигаться согласно гидравлическому градиенту. Скорость пополнения водоносного горизонта зависит как от литологической структуры, так и от гидропроводности данного горизонта. Механизм пополнения водоносной системы является важным фактором, влияющим на область насыщения. Таким образом, *коэффициент пополнения* может быть использован для составления карты водоносного потенциала [30].

Литологическая структура основного водоносного горизонта представлена неконсолидированными и консолидированными породами, разломами и карстовыми породами. Большая часть трещиноватой породы содержит нарушения сплошности, которые считаются хо-

рошими показателями структуры, обеспечивающей большие запасы подземных вод. Аллювиальные водоносные системы в западной части п-ова Анатолия содержат гетерогенные породы, такие как крупнозернистые гравии и пески, а также мелкозернистые глины и алевроиты [31]. Согласно залежам аллювиальных осадочных пород, мелкозернистые породы отклоняются от рельефа местности, а крупнозернистые концентрируются вдоль холмистой береговой линии [27]. Литологическая структура влияет на гидрогеологические параметры горизонта в контексте продуктивности, т.е. наличие крупнозернистых пород обеспечивает высокую продуктивность по сравнению с мелкозернистыми породами.

Гидропроводность определяет, насколько эффективно подземные воды проходят через поры и трещины горизонта под воздействием гидравлического градиента. Коэффициент k напрямую зависит от литологической структуры, которая в свою очередь влияет на потенциалы пополнения и расхода подземных вод [27, 32, 33]. Гидропроводность водоносных горизонтов необходима для оценки водоносного потенциала. Гетерогенные аллювиальные водоносные системы обладают различными значениями гидропроводности как функции литологической структуры.

Глубина до уровня подземных вод — важный параметр оценки водоносного потенциала. Для того чтобы составить план строительства буровых скважин и оценить водоносный потенциал, необходимо определить область насыщения [12, 30]. Из-за расхода подземных вод мощность области насыщения уменьшается и уменьшается потенциальная продуктивность горизонта. Водоносный потенциал отрицательно коррелирует с глубиной до уровня подземных вод. При уменьшении этого уровня область насыщения становится крайне малой из-за ограниченной мощности горизонта. Глубина до уровня подземных вод может влиять на гидродинамическое состояние скважины из-за коэффициента потребления скважины и ограниченной области насыщения.

В настоящей работе в расчет индекса водоносного потенциала включены указанные гидрогеологические параметры. Линейное сочетание рейтинговых и весовых значений этих параметров позволило получить численное значение индекса, которое в дальнейшем использовано для оценки потенциала водоносного горизонта исходя из пяти категорий. Данные категории классифицируют потенциал водоносного горизонта как очень низкий, низкий, умеренный, высокий и очень высокий. После сбора данных со скважин, расположенных в рассматриваемом бассейне, они были преобразованы в индексные значения (т. е. 1, 2, 3, 4 и 5) на основе критериев, указанных в табл. 1. В результате анализа входных данных получена индексная сеть из значений 1–5, которые комбинируются для получения значения общего индекса водоносного потенциала (API). На основе использования критериев из табл. 2 составлена карта значений API :

$$API = At_w At_r + K_w K_r + S_w S_r + R_w R_r + L_w L_r + D_w D_r, \quad (1)$$

где At_w, At_r — весовое и рейтинговое значения мощности водоносного горизонта; K_w, K_r — весовое и рейтинговое значения гидропроводности; S_w, S_r — весовое и рейтинговое значения удельной продуктивности; R_w, R_r — весовое и рейтинговое значения коэффициента пополнения; L_w, L_r — весовое и рейтинговое значения литологической структуры горизонта; D_w, D_r — весовое и рейтинговое значения глубины до уровня подземных вод.

ТАБЛИЦА 1. Параметры для определения водоносного потенциала

Параметр	Индексное значение	Диапазон	Рейтинг	Потенциал
Мощность водоносного горизонта, м	6	> 100.0	5	Очень высокий
		100.0 – 50.0	4	Высокий
		50.0 – 25.0	3	Умеренный
		25.0 – 10.0	2	Низкий
		< 10.0	1	Очень низкий
Удельный коэффициент продуктивности, л/(с·м)	5	> 10.0	5	Очень высокий
		5.0 – 10.0	4	Высокий
		1.0 – 5.0	3	Умеренный
		0.1 – 1.0	2	Низкий
		< 0.1	1	Очень низкий
Коэффициент пополнения, мм	4	> 250.0	5	Очень высокий
		200.0 – 250.0	4	Высокий
		100.0 – 150.0	3	Умеренный
		50.0 – 100.0	2	Низкий
		< 50.0	1	Очень низкий
Литологическая структура	3	Карстовые породы и поврежденные водоносные горизонты	5	Очень высокий
		Гравий и песок	4	Высокий
		Массивные породы, глинистый гравий и песок	3	Умеренный
		Сланец и глинистый песок	2	Низкий
		Глина и глинистый сланец	1	Очень низкий
Гидропроводность, м/с	2	$> 10^{-2}$	5	Очень высокий
		$10^{-3} - 10^{-2}$	4	Высокий
		$10^{-5} - 10^{-3}$	3	Умеренный
		$10^{-7} - 10^{-5}$	2	Низкий
		$< 10^{-7}$	1	Очень низкий
Глубина до уровня подземных вод, м	1	< 5.0	5	Очень высокий
		5.0 – 15.0	4	Высокий
		15.0 – 30.0	3	Умеренный
		30.0 – 50.0	2	Низкий
		> 50.0	1	Очень низкий

ТАБЛИЦА 2. Соответствие категории водоносного потенциала индексу API

API Индекс	Потенциал
> 90	Очень высокий
50 – 90	Высокий
30 – 50	Умеренный
< 30	Низкий

АНАЛИЗ БАСЕЙНА РЕКИ МАЛЫЙ МЕНДЕРЕС (БРММ)

Район исследования расположен южнее г. Измир, находящегося на западе полуострова Анатолия. На территории бассейна проживают около 3 750 000 чел., расположено 8 городов и большое количество деревень. Площадь бассейна 3502 км², площадь аллювиальной области

1100 км², что составляет 31 % от общей площади бассейна [34]. Равнины, покрытые аллювиальными отложениями, в основном используются для сельского хозяйства, промышленности и в других целях. Наибольшая плотность населения наблюдается в западной части бассейна (на территориях городов Торбалы и Сельчук), наименьшая плотность — в районе г. Кираз.

Бассейн р. Малый Мендерес обладает типичным средиземноморским климатом: летом теплый и сухой, а зимой дождливый и умеренный [35, 36]. В городах Кираз и Боздаг наблюдается наибольший уровень годовых осадков, который измеряется станциями Датского метеорологического института (DMI) [37]. Степень насыщения грунта водой рассчитана с помощью методов Торнтуэйта (табл. 3).

ТАБЛИЦА 3. Гидрометеорологические характеристики рассматриваемой области, мм

Параметр	г. Торбалы	г. Тир	г. Сельчук	г. Одемиш	г. Байындыр	г. Овакент
Уровень выпадающих осадков	714.0	841.8	687.7	664.7	641.5	596.0
Уровень испарения	264.0	281.0	311.2	267.8	272.5	245.9
Уровень водостока	248.6	309.5	280.7	231.4	218.0	194.2
Пополнение водоносного горизонта	201.4	251.3	95.8	165.5	151.0	155.9

Согласно данным метеорологической станции г. Измир, которые собираются около 90 лет (1929–2020), в бассейне наблюдается нисходящий тренд в уровне выпадающих осадков примерно на 1 мм/год, что значительно превышает среднее значение по стране 0.29 мм/год. Средний годовой расход воды в р. Малый Мендерес составляет 11.5 м³/с. В основе БРММ лежит грабен, окруженный большой горной системой. В данном регионе сельское хозяйство и промышленность — ключевые отрасли экономики, где большая часть населения вовлечена в средне- и крупномасштабное сельское хозяйство. На территории бассейна наибольшие промышленные районы расположены в плодородных областях, в частности в городах Торбалы и Тир.

Горные районы из-за значительной высоты не подходят для основания населенных пунктов и сельского хозяйства, а добыча подземных вод — крайне трудоемкая. В рассматриваемой области добыча подземных вод — важный фактор для сельского хозяйства. Тем не менее городские и промышленные районы также хорошо развиты. Соответствующие законодательные акты выделяют восемь классов земли в зависимости от ее плодородности [38]. Земли I и II класса очень плодородные, тогда как земли VI и VII класса утратили пригодность к сельскохозяйственной деятельности. Основные земли, используемые для сельского хозяйства, расположены в аллювиальной области. В БРММ аллювиальная область — центр сельскохозяйственного производства и основная водоносная система для добычи подземных вод.

Эгейский регион расположен на Альпийско-Гималайском складчатом поясе и является частью тектонически активной зоны с большим количеством линий разломов [31, 39]. Основные следы тектонической активности в регионе представляют грабен-разломы, простирающиеся с востока на запад. Эти разломы сформировали несколько грабен-равнин, включающих бассейны рек Малый Мендерес, Большой Мендерес и Гедиз [31, 39]. Системы вертикальных разломов влияют на характер и мощность аллювиальных слоев, которые образуются на поверхности рассматриваемых равнин.

Данные системы влияют на водоносные свойства аллювиальных слоев таким образом, что поверхностные воды, текущие с горных склонов, впитываются в аллювиальные слои и образуют региональные водоносные системы внутри равнин [3]. Согласно геологическим и гидрогеологическим данным, метаморфические породы палеозойской эры образуют основание бассейна р. Малый Мендерес. Выход таких пород на поверхность наблюдается на востоке бассейна. На нижних уровнях эти породы состоят из слюды и хлористого сланца, на верхних уровнях — из доломитового мрамора. Мраморно-карстовая водоносная система считается главным источником подземных вод в данном регионе.

Результаты геологических исследований показали, что в рассматриваемой области наиболее важной водосодержащей формацией является аллювиальная водоносная система (рис. 1). Поверхностная водоносная система состоит из аллювиальных месторождений, которые служат основными источниками подземных вод и формируют наиболее плодородные сельскохозяйственной земли. Необходимо отметить, что в результате чрезмерной эксплуатации подземных вод, роста населенных пунктов и промышленных районов возникли значительные проблемы с качеством и количеством подземных вод. Определение потенциальных водоносных районов стало важной задачей по их защите от антропогенной деятельности и для эффективного управления бассейном в регионе.

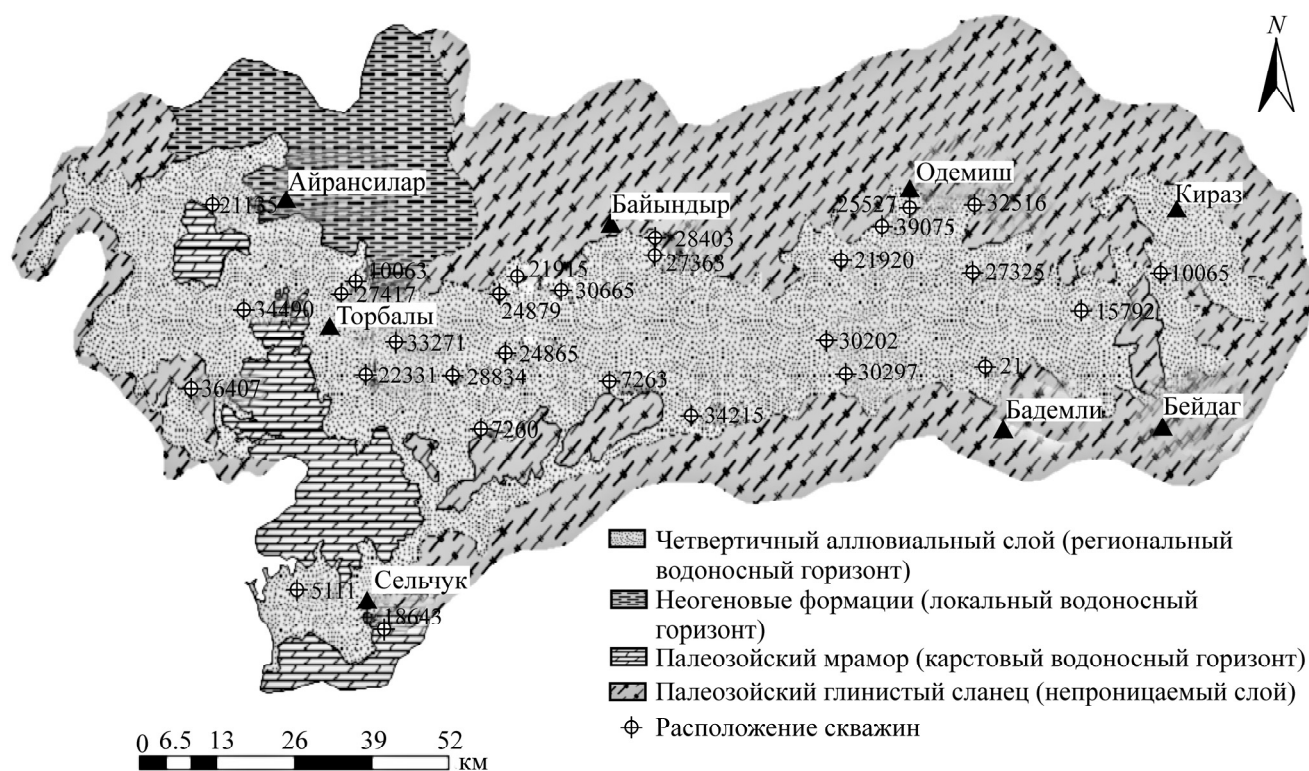


Рис. 1. Геологическая и гидрогеологическая карта рассматриваемой области [34]

Для составления карты потенциала водоносных систем использованы такие гидрогеологические параметры, так мощность водоносного горизонта, удельная продуктивность, литологическая структура, глубина до уровня подземных вод. Значения этих параметров для ряда скважин представлены в табл. 4.

ТАБЛИЦА 4. Данные со скважин для расчета индекса API

Номер скважины	Координаты			Мощность горизонта, м	Литологическая структура	Глубина, м	Удельная продуктивность, л/(с·м)	Гидро-проводность, м/с
	X	Y	Z					
10063	532205	4226990	62	30.63	Песок – глина	35	23	2.66E-04
10065	606275	4227690	232	74	Глинистый песок	15	0.19	2.20E-06
15792	598975	4224775	162	53	Песок – гравий	29.9	1.7	1.97E-05
18643	533310	4201298	20.39	25	Карстовый мрамор	5.05	106.7	1.23E-03
21036	519000	4232850	156	63	Глинистый песок – гравий	28	2.3	2.66E-05
21915	547150	4227500	48.5	36.5	Песок и глинистый гравий	21	4.3	4.98E-05
21920	576900	4228625	99	59	Песок – гравий	10	2.2	2.55E-05
22331	533125	4219975	6	22.5	Карстовый мрамор	5.5	153	1.77E-03
24865	545900	4221575	21	23	Песок и сланец	5	1.2	1.39E-05
24879	545434	4226125	21	42	Песок и глинистый гравий	18.2	1	1.16E-05
25527	583385	4232697	129.5	55	Песок – гравий	15	0.33	3.82E-06
26777	527750	4226300	37.5	24.3	Карстовый мрамор	11.7	37.9	4.39E-04
27325	589075	4227655	117.5	80	Песок	12.6	0.7	8.10E-06
27363	559780	4229036	75.6	19.8	Песок и глинистый гравий	35	0.5	5.79E-06
27417	530850	4226050	50.5	81	Неогеновый известняк	28	11.8	1.37E-04
28403	559700	4230410	85	30	Глинистый алевроит и песок	22	5.2	6.02E-05
28854	541100	4219875	17.5	36	Песок – гравий	8.6	0.2	2.31E-06
30202	575475	4222550	86	67	Алевритовый песок	11.8	2.7	3.13E-05
30297	577300	4219950	119	50	Алевритовый песок	41	0.8	9.26E-06
30310	536175	4220125	15	39	Песок – гравий	21	9.3	1.08E-04
30665	550968	4226417	30	66	Песок – гравий	17.6	8.8	1.02E-04
32516	589200	4233000	157	78	Песок – гравий	33.6	2	2.31E-05
33271	535950	4222450	25	73	Неогеновый песчаник	15	1.9	2.20E-05
34215	563125	4216750	80	69	Песок – гравий	11	5.6	6.48E-05
36407	517125	4218875	62	110	Известняк	40	1.7	1.97E-05
39075	580675	4231330	117	69	Песок – гравий	29	0.7	8.10E-06
34490	521975	4224850	43	53	Карстовый мрамор	30	128.6	1.49E-03
7260	543661	4215708	18	38	Гравий	6	12.7	1.47E-04
7263	555514	4219437	39	82	Песок – гравий	15	6.3	7.29E-05
21	590276	4220502	131	29	Песчаный гравий	4.5	1.25	1.45E-05
5111	526880	4203322	6	32	Алевритовый песок	1	3.5	4.05E-05
7263	556960	4222200	39	24	Песок – гравий	6	2.9	3.36E-05

Примечание. X — широта; Y — долгота; Z — высота над уровнем моря, м

Карты мощности водоносных горизонтов и их гидропроводности составлены с помощью данных со скважин, расположенных в бассейне (табл. 4). Мощность водоносного горизонта в общей водоносной системе изменчива ввиду своих гетерогенных свойств по сравнению с однородными системами. Также на мощность горизонтов влияет тектоническая система грабена. Горизонты с наибольшей мощностью расположены в северной части равнины г. Торбалы, которая является густонаселенной областью (рис. 2). Наименьшие значения гидропроводности наблюдаются в восточных частях бассейна в окрестностях г. Кираз.

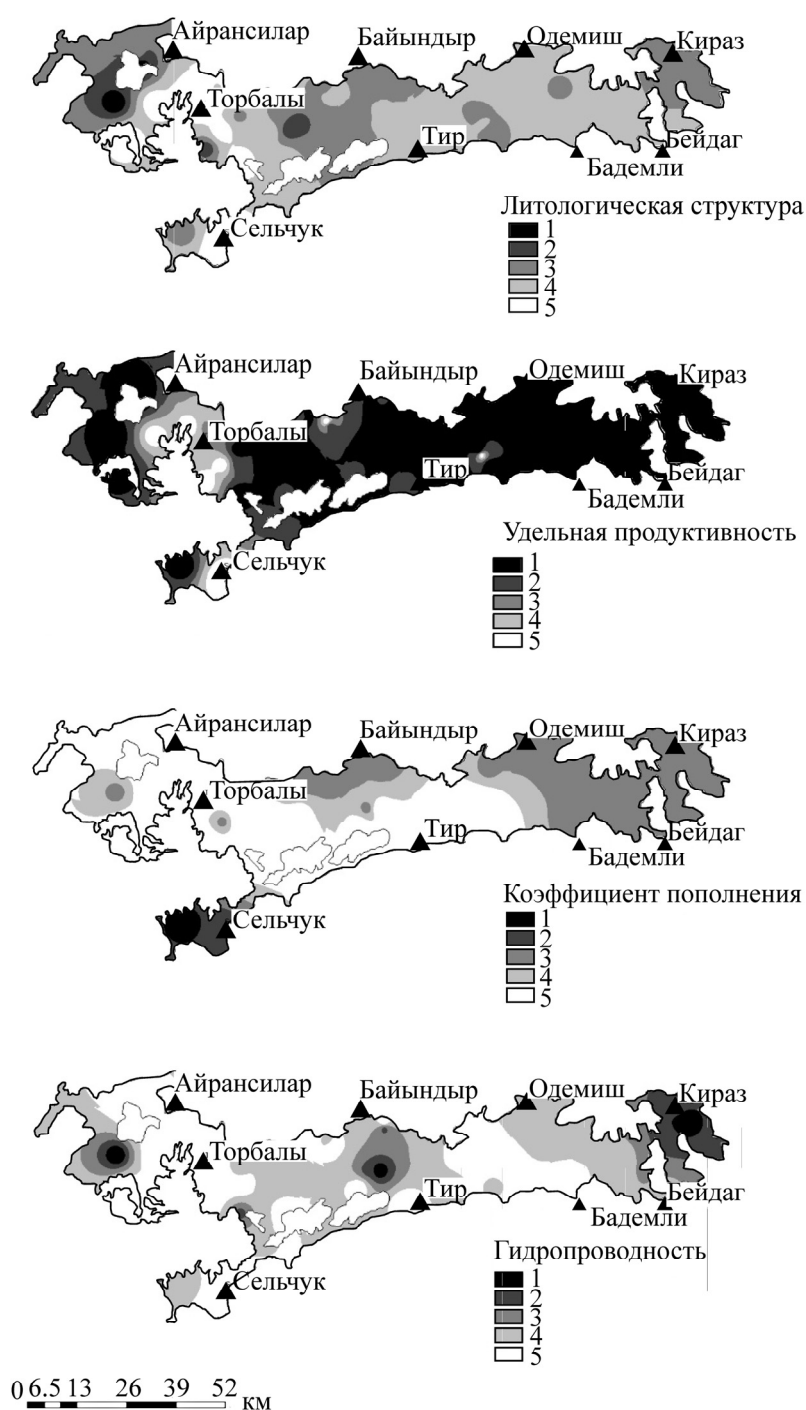


Рис. 2. Карты индексных значений поверхностного водоносного горизонта

Литологическая структура водоносной системы играет важную роль при низких значениях гидропроводности из-за наличия непроницаемых слоев, которые в данном районе преобладают (рис. 2). Однако в рассматриваемой области присутствует много районов с высокой гидропроводностью (особенно равнины городов Торбалы и Сельчук). Это обусловлено доминирующими слоями из гравия и песка. Высокое значение гидропроводности показывает, что водоносная система в районе достаточно проницаема, что является подходящим условием для добычи подземных вод.

Литологическая структура водоносной системы, в которую входят осадочные породы различной зернистости, влияет на объем подземных вод. Согласно установленным критериям из табл. 4, составлена литологическая карта (рис. 2). По данным этой карты, литологическая структура поверхностной водоносной системы образована смесью глины, алевролита, песка и сланца. Эти формации важны как на локальном, так и на региональном уровне. Гравий и песок — высокопроницаемые породы, обеспечивающие значительную долю подземных вод; это видно в западной части бассейна, особенно на равнинах городов Сельчук и Торбалы. Глина, алевролит и сланец в основном отмечаются на северо-западе и юге от г. Байындыр, а также в окрестностях г. Кираз. Крупнозернистые осадочные породы расположены на западе равнины г. Торбалы.

Значения удельной продуктивности водяных скважин в бассейне неравномерны, так как в структуру водоносных горизонтов входят гетерогенные осадочные породы. Некоторые проницаемые осадочные породы, такие как гравий и песок, обладают высокой удельной продуктивностью по сравнению с мелкозернистыми осадочными породами. С этой точки зрения наибольшие значения удельной продуктивности отмечаются в западных частях бассейна, на равнинах городов Торбалы и Сельчук (рис. 2). Общей чертой данных районов является литологическая структура и мощность водоносных горизонтов. В остальных районах в состав аллювиальных осадочных пород входят мелкозернистые породы с низкой удельной продуктивностью.

Другим важным параметром для определения потенциала водоносной системы является коэффициент пополнения. На механизм пополнения подземных вод за счет выпадения осадков влияют несколько факторов: литологическая структура, глубина до уровня подземных вод, топографический уклон и деятельность на поверхности. Долгосрочный анализ данных показал общее понижение горизонтов подземных вод с примерной скоростью 0.75 мм/год, что связано как со снижением количества выпадения осадков, так и с чрезмерной эксплуатацией водоносной системы [37]. Выпадение осадков — основной источник пополнения поверхностных водоносных систем. Рассчитанные коэффициенты пополнения для различных районов на основе региональных метеоданных представлены на рис. 3. Наибольший коэффициент пополнения зафиксирован в западных и северных районах, где высокий уровень выпадения осадков, плоский рельеф местности и проницаемая литологическая структура (рис. 2). С точки зрения потенциала пополнения водоносной системы наиболее важными районами является западная часть бассейна, где расположены равнины городов Торбалы и Тир.

На рис. 3 представлена карта индексных значений глубины до уровня подземных вод. Течение подземных вод в аллювиальной водоносной системе направлено с востока на юго-запад. Глубина до водного горизонта в поверхностной водоносной системе неравномерна. Причиной колебаний служит механизм пополнения и чрезмерная добыча подземных вод, из-за которой, в частности в равнине г. Торбалы, происходит значительное снижение глубины до уровня подземных вод. Сезонное снижение и повышение уровня подземных вод в песчано-гравийной аллювиальной системе в равнине г. Торбалы обусловлено механизмом пополнения. Оно может

достигать 30 м, что свидетельствует о динамичном поведении потока подземных вод в аллювиальной системе [37]. Считается, что поверхностная водоносная система пополняется из р. Малый Мендерес, которая является одной из главных рек в регионе. На западе бассейна, где расположены увлажненные земли, обнаружены подземные воды с наименьшей глубиной до уровня подземных вод. Сделан вывод, что согласно гидрогеологическим параметрам западные части аллювиальной водоносной системы имеют большой потенциал.

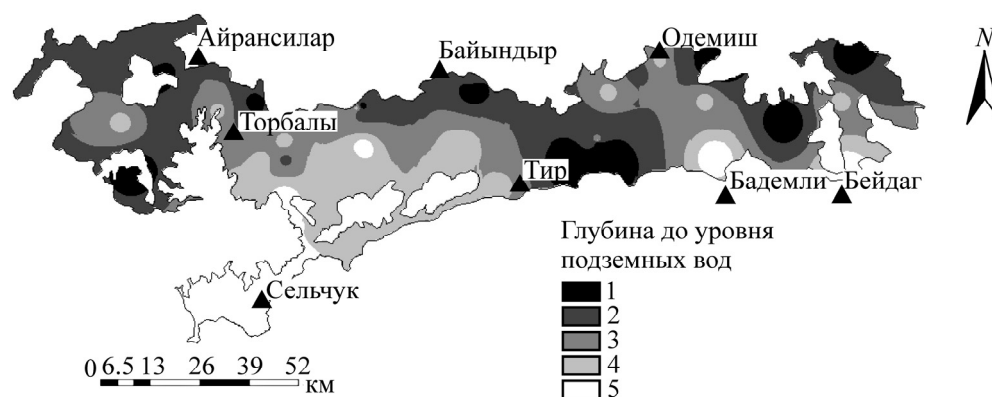


Рис. 3. Карта индексных значений глубины до уровня подземных вод

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для создания сети файлов карты индексов потенциальных водоносных систем использован метод обратных взвешенных расстояний. Затем сети файлов преобразованы в сети индексов для определения линейного сочетания карты индекса водоносного потенциала аллювиальных водоносных систем в бассейне р. Малый Мендерес.

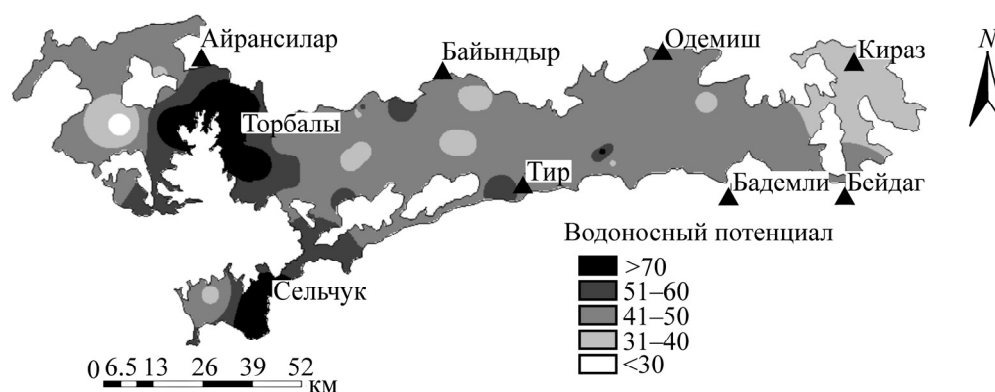


Рис. 4. Окончательная карта индексов водоносного потенциала (API)

На рис. 4 пространственное распределение потенциальных водоносных систем в бассейне представлено индексами, что позволило принимать решения в рамках оценки относительного потенциала каждой водоносной системы при определении защитных участков и при выборе наиболее подходящих мест для добычи питьевой воды. Оценка карты индексов водоносного потенциала, составленная на основе расчета значений API, выполнена по четырем категориям, приведенным в табл. 3.

Если расчетное значение индекса водоносного потенциала ниже 30, то водоносный потенциал в соответствующем районе считается низким. Большое количество скважин, эксплуатирующихся в этих районах, могут обеспечить только садовую ирригацию и домашние потреб-

ности в ограниченном объеме. Водоносные системы такой категории не могут удовлетворить городские и промышленные потребности в питьевой воде из-за низкой мощности водоносного горизонта, непроницаемых слоев и слабой удельной продуктивности. Согласно политике по защите возобновляемых источников воды, необходимо предпринять ряд мер для защиты таких областей от загрязнения подземных вод, возникающего при неконтролируемом сбросе отходов и сточных вод. Неконтролируемый сброс жидких бытовых и промышленных отходов не только загрязняет основную поверхностную водоносную систему, но и негативно влияет на водоносный потенциал с точки зрения его использования.

Если значение рассчитанного индекса находится между 30 и 50, то водоносный потенциал в соответствующем районе считается умеренным. Эти районы обычно состоят из умеренных или полностью проницаемых осадочных пород, которые обладают мощными насыщенными областями. Такие водоносные системы могут быть использованы для небольших населенных пунктов, сельскохозяйственной ирригации и среднемасштабной промышленности. Данные системы отличаются средними значениями продуктивности и гидропроводности. Доминирующими породами здесь являются песок и глинистый песок.

В таких районах функционирует множество скважин, обеспечивающих питьевой водой города Байындыр, Кираз и Одемиш, поэтому необходимо предпринять предупреждающие меры по защите скважин от загрязнения. С точки зрения защиты водоносных систем и планирования использования подземных вод, водоносные системы с умеренным потенциалом должны быть защищены как от вредной промышленной деятельности, так и от чрезмерной добычи воды. На территории бассейна самое большое потребление подземных вод приходится на крупные промышленные фабрики. Необходимо остановить строительство больших промышленных предприятий, так как значительные изменения уровня подземных вод в водоносной системе могут негативно отразиться на социально-экономическом уровне жителей БРММ, который является крупным сельскохозяйственным и промышленным центром в Эгейском регионе. В результате нехватки водных ресурсов многие фермеры могут остановить свою деятельность, а крупные промышленные фабрики закрыться. Следует внедрять новые ирригационные технологии в районах с умеренным и низким водоносным потенциалом, в которых наблюдается сокращение водных ресурсов.

Если значение индекса находится между 50 и 60, то водоносный потенциал в районе считается высоким, включая высокую гидропроводность, мощные области насыщения и высокую удельную продуктивность водоносных систем. При анализе карты водоносного потенциала на рис. 4 видно, что наиболее продуктивные районы расположены на равнинах городов Тир, Сельчук и Торбалы. Литологическая структура в данных районах достаточно проницаемая, включает гравийные и песчаные осадочные породы, которые имеют большой объем подземных вод. Эти районы обеспечивают жилые и сельскохозяйственные области питьевой и ирригационной водой высокого качества. Добыча подземных вод здесь должна регулироваться местными органами власти. Для защиты подземных вод необходимо ежегодно формировать соответствующий бюджетный план, а также избегать чрезмерного использования водоносных систем.

Если значение рассчитанного индекса превышает 70, то водоносный потенциал считается очень высоким. Такие условия делают район идеальным для добычи питьевой и ирригационной воды. Район с высоким водоносным потенциалом расположен между равнинами городов Торбалы и Сельчук. Пополнение аллювиальных водоносных систем в таких районах относительно высокое, поэтому они более чувствительны к загрязнению от антропогенной деятельности на поверхности. К сожалению, крупнейшие промышленные предприятия в окрестности г. Измир, а также свалка бытовых отходов г. Торбалы расположены на этих водоносных системах. Высокопродуктивная область добычи подземных вод совпадает с основным промышлен-

ным районом в БРММ. Такое использование земли стало причиной снижения водоносного потенциала с точки зрения его качества и количества, а также причиной снижения эффективности использования сельскохозяйственных земель в регионе. Для того чтобы удовлетворить потребность в воде для питьевых, ирригационных и промышленных целей, водоносные системы с высоким потенциалом должны быть защищены от необдуманного землепользования и чрезмерного потребления водных ресурсов. В рамках защиты и планирования использования водоносных систем значительную роль играют органы местной власти, организация State Hydraulic Work и политика правительства.

Несмотря на то, что много поверхностных водных ресурсов и границы их пополнения находятся под защитой, в рассматриваемом регионе отсутствует стратегия и меры по защите высокопродуктивных источников подземных вод. Учитывая, что примерно 65% бытового использования воды приходится на подземные воды, в БРММ необходимо принять меры по защите совокупных водных ресурсов. Также следует учесть, что в пределах бассейна функционирует множество скважин (более 50 тыс.), поэтому данный бассейн необходимо взять под охрану. Стратегии по защите бассейна р. Малый Мендерес должны включать следующие мероприятия: защиту основной водоносной системы от нелегальных скважин, перенос расширяющихся промышленных и городских областей из районов с низким водоносным потенциалом, защиту сельскохозяйственных земель и района основной водоносной системы от загрязнения, а также предотвращение чрезмерной добычи подземных вод.

Предприятия, расположенные на основной водоносной системе, являются причиной загрязнения подземных вод и снижения водного горизонта из-за нецелесообразного землепользования [3, 37, 40]. Анализ карты водоносного потенциала показывает, что планирование землепользования должно осуществляться местными и общественными органами власти для контроля состояния подземных вод. В противном случае многие бассейны рек в Эгейском регионе, включая бассейн р. Малый Мендерес, столкнутся с серьезными геоэкологическими и социально-экономическими проблемами в результате ущерба высокопродуктивных запасов подземных вод.

ВЫВОДЫ

С помощью GIS — интегральной технологии картирования уязвимости — выполнена оценка водоносного потенциала бассейна р. Малый Мендерес с целью защиты и управления поверхностной водоносной системой, находящейся в пределах бассейна реки. В основе предлагаемой методики лежит метод индексации, в котором использованы шесть гидротехнических параметров для определения водоносного потенциала: мощность горизонта; гидропроводность; литологическая структура; коэффициент пополнения; удельная продуктивность и глубина до уровня подземных вод. Сочетание данных параметров образует индекс API, который применяется для оценки водоносного потенциала по четырем категориям.

Использование GIS упрощает общую процедуру анализа и позволяет оценить пространственное распространение поверхностной водоносной системы. Анализ показал, что поверхностная водоносная система бассейна состоит из средне- и высокопродуктивных районов, которым необходима защита от антропогенной деятельности. Согласно карте индексов водоносного потенциала, районы с наибольшим потенциалом находятся в западной части бассейна, на равнинах городов Торбалы и Тир, где расположены крупные промышленные предприятия и свалки бытовых отходов. Данный высокопродуктивный район не подходит для дальнейшего развития промышленных предприятий и городского строительства, поэтому местными органами власти необходимо принять меры по защите водоносной системы. Строительство новых городских и промышленных объектов следует планировать в районах с низким водоносным потенциалом, которые расположены на востоке бассейна.

Определение районов с высоким водоносным потенциалом в региональной водоносной системе — базовое требование для эффективного планирования и управления подземными водными ресурсами. Это является важным фактором в регионах с высокой потребностью в подземных водах, особенно в полусухом Эгейском регионе. Снижение качества и количества запасов подземных вод негативно влияет на все бассейны рек, входящие в общую гидрографическую сеть. Политика управления водными ресурсами в Турции должна способствовать защите бассейнов рек, т.е. осуществлению контроля за качеством обеспечения водой, за сточными водами и за всей экосистемой.

Окончательная карта индексов водоносного потенциала станет удобным инструментом для защиты и управления поверхностной водоносной системой, поможет выявить наиболее подходящие места для организации водяных скважин и позволит провести оценку качества и количества подземных вод.

Авторы выражают благодарность проф. д.т.н Орхану Гундузу, кафедра “Охрана окружающей среды”, Технологический институт в г. Измир, за помощь в написании данной работы, составлении карт и полезные замечания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Kacaroglu F. and Gunay G.** Impacts of human activities on groundwater quality on an alluvial aquifer; a case study: Eskisehir Plain in Turkey, *Hydrogeology J.*, 1997, Vol. 5, No. 3. — P. 60–70. DOI: 10.1007/s100400050257.
2. **Nas B. and Berktaş A.** Groundwater contamination by nitrates in the city of Konya (Turkey); A GIS Perspective, *J. Environ. Manage.*, 2006, Vol. 79. — P. 30–37. DOI: 10.1016/j.jenvman.2005.05.010.
3. **Simsek C., Gemici U., and Filiz S.** An assessment of surficial aquifer vulnerability and groundwater pollution from a hazardous landfill site: Torbali/Turkey, *Geosciences J.*, 2008, Vol. 12. — P. 69–82. DOI: 10.1007/s12303-008-0009-6
4. **Ibe K. M. and Agbamu P. U.** Impacts of human activities on groundwater quality of an alluvial aquifer: a case study of the Warri River, Delta State, SW, Nigeria, *Int. J. of Environmental Health Research*, 2010, Vol. 9. — P. 329–334.
5. **Official Gazette** (Republic of Turkey), 2012. Regulation of the conservation and management plans preparation of the water basin, *Official Gazette* No. 28444.
6. **Murray K. S. and Roger D. T.** Groundwater vulnerability, brownfield redevelopment and land use planning, *J. Environ. Planning and Manage.*, 1999, Vol. 42. — P. 801–810. DOI: 10.1080/09640569910830.
7. **Berg R. C., Curry B. B., and Olshansky B.** Tools for groundwater protection planning: an example from McHenry County, Illinois, USA. *Environ. Manage.*, 1999, Vol. 23. — P.321–31.
8. **Aller L., Bennett T., Lehr J. H., Petty R. J., and Hackett G.** DRASTIC: A standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeological settings, Prepared for the US Environ, Protection Agency, Office of Research and Development, EPA-600/2-87-035, National Water Well Association, Dublin, OH, 1987.
9. **Foster S. S. D.** Groundwater recharge and pollution vulnerability of British aquifers: a critical overview, *Geological Society Special Publication*, London, 1998, Vol. 130. — P. 23–35.
10. **Civita M. V.** Le carte della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento: Teoria & pratica” [Groundwater vulnerability maps to contamination: Theory and practice], Pitagora Editrice, Bologna, 1994. — 325 p.
11. **Edet A. E.** Vulnerability evaluation of a coastal plain sand aquifer with a case example from Calabar, southeastern Nigeria, *Environ. Geology*, Vol. 45, 2004. — P.1062–1070. DOI: 10.1007/s00254-004-0964-9.

12. **Simsek A., Kincal C., and Gunduz O.** A solid waste disposal site selection procedure based on ground-water vulnerability mapping, *Environ. Geology*, 2006, Vol. 49. — P. 620–633. DOI: 10.1007/s00254-005-0111-2.
13. **Sree Devi P. D., Srinivasulu S., and Kesava Raju K.** Hydro-geomorphological and groundwater prospects of the Paregu river basin by using remote sensing data, *Environ. Geology*, 2001, Vol. 40. — P. 1088–1094. DOI: 10.1007/s002540100295.
14. **Shankar M. N. R. and Mohan G.** Assessment of the groundwater potential and quality in Bhatsa and Kalu river basins of Thane district, western Deccan Volcanic Province of India, *Environ. Geology*, 2006, Vol. 49. — P. 990–998. DOI: 10.1007/s00254-005-0137-5.
15. **Etterazzini S.** Groundwater potentiality index: a strategically conceived tool for water research in fractured aquifers, *Environ. Geology*, 2006, Vol. 52. — P. 477–487. DOI: 10.1007/s00254-006-0481-0.
16. **Rao N. S.** Groundwater potential index in a crystalline terrain using remote sensing data, *Environ. Geology*, 2006, Vol. 50. — P. 1067–1076. DOI: 10.1007/s00254-006-0280-7.
17. **Cai X., McKinney D., and Lasdon L.** Integrated hydrologic-agronomic-economic model for river basin management, *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 2003, Vol. 129. — P. 4–17. DOI: 10.1061 (ASCE)0733-9496(2003)129:1(4).
18. **Mekki I., Jacob F., Marlet S., and Ghazouani W.** Management of groundwater resources in relation to oasis sustainability: The case of the Nefzawa region in Tunisia, *J. Environ. Manage.*, 2013, Vol. 121. — P. 142–151. DOI: 10.1006/j.jenvman.2013.02.041.
19. **Bekele E. B., Salama R. B., Commander D. P., Otto C. J., Hick W. P., Watson G. D., Pollock D. W., and Lambert P. A.** Estimation of groundwater recharge to the Parmelia aquifer in the Northern Perth Basin 2001–2002; CSIRO Land and Water Technical Report 10/03, 2003.
20. **Dimitriou, E. and Zacharias I.** Groundwater vulnerability and risk mapping in a geologically complex area by using stable isotopes, remote sensing and GIS techniques, *Environ. Geology*, 2006, Vol. 51. — P. 309–323. DOI: 10.1007/s00254-006-0328-8.
21. **Simsek C. and Gunduz O.** IWQ Index: A GIS-integrated technique to assess irrigation water quality, *Environ. Monitoring and Assessment*, 2007, Vol. 128. — P. 277–300. DOI: 10.1007/s10661-006-9312-8.
22. **Demircioğlu M. and Down J.** The utility of vulnerability maps and GIS in groundwater management: a case study, *Turkish J. Earth. Sci.*, 2014, Vol. 23. — P. 80–90.
23. **Demirkesen A. C., Budak, S., Simsek, C., and Baba A.** Investigation of groundwater potential and groundwater pollution risk using the multi-criteria method: a case study (the Alaşehir sub-basin, western Turkey), *Arabian J. Geosciences*, 13:10, Art. 2020, Vol. 385. — P. 1–15.
24. **DSI.** Hydrogeology of Kucuk Menderes Plain, State Hydraulic Works of Turkey (DSI), Department of Groundwater and Geotechnical planning in Izmir, 1973.
25. **Yazicigil H., Doyuran V., Karahanoglu N., Camur Z., Toprak V., Rojay B., Yilmaz K. K., Sakiyan J., Suzen M. L. and Yesilnacar E.** Evaluation and management project of Kucuk Menderes River Basin groundwaters within the scope of hydrogeological investigations (Project Report in Turkish), State Hydraulic Works (DSI), Geotechnical Services and Groundwaters Division, Ankara, METU-AGUDOS 98-03-09-01-01, 2000.
26. **DMI.** Meteorological data of Izmir (Guzelyali) and Adnan Menderes Airport meteorological stations, State Meteorological Service, Ankara, 2010.
27. **Sen Z.** Applied hydrogeology for scientists and engineers, Lewis Publ., 1995, New York.
28. **USGS.** Factors affecting specific-capacity tests and their application — a study of six low-yielding wells in fractured-bedrock aquifers in Pennsylvania, *Scientific Invest. Series*, 2010. — P. 2010–5212.
29. **Winter T. C., Harvey J. W., Franke O. L., and Alley W. M.** Ground water and surface water, a single resource: U.S. Geological Survey Circular, 1998, Vol. 1139. — 79p. <https://doi.org/10.3133/cir1139>

30. **Simsek C., Demirkesen A. C., Baba A., Kumanlioglu A., Durukan S., Aksoy N., Demirkiran Z., Hasozbek A., Murathan A., and Tayfur G.** Estimation groundwater total recharge and discharge using GIS-integrated water level fluctuation method: a case study from the Alaşehir alluvial aquifer, Western Anatolia, Turkey, *Arabian J. of Geosciences*, 2020, 13:3, Art. 143, 1 – 14.
31. **Eskisar T., Kuruoglu M., Altun S., Ozyalin S., and Yilmaz H. R.** Site response of deep alluvial deposits in the northern coast of Izmir Bay (Turkey) and a microzonation study based on geotechnical aspects. *Eng. Geology*, 2014, 172:8. — P. 95 – 116. DOI: 10.1016/j.enggeo.2014.01.006.
32. **Simsek C.** The GIS integrated surficial aquifer potential mapping and its importance for aquifer protection, Kucuk Menderes Basin/Western Turkey, *Int. Congress on River Basin Management, Antalya, Proceedings Book*, 2007. — P.78 – 94.
33. **Nazarova L. A. and Nazarov L. A.** Geomechanical and hydrodynamic fields in producing formation in the vicinity of well with regard to rock mass permeability-effective stress relationship, *J. Min. Sci., Geomechanics*, 2018, 54:4, 541 – 549.
34. **Sakiyan J. and Yazicigil H.** Sustainable development and management of an aquifer system in western Turkey, *Hydrogeology J.*, 2004, Vol. 12. — P. 66 – 80. DOI: 10.1007/s10040-003-0315-z.
35. **Trenberth K. E., Jones P. D., Ambenje P., Bojariu R., Easterling D., Klein Tank A., Parker D., Rahimzadeh F., Renwick J. A., Rusticucci M., Soden B., and Zhai P.** Observations: surface and atmospheric climate change. In: *Climate Change 2007: the physical science basis, Contribution of Working Group I to the fourth assessment report of the Intergovernmental panel on climate change*, Cambridge University Press, Cambridge/United Kingdom, 2007.
36. **Gunduz O. and Simsek C.** Influence of climate change on shallow groundwater resources: the link between precipitation and groundwater levels in alluvial systems, *Book Chapter 25. Climate change and its effects on water resources, NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security 3*, Springer Science+Business Media B.V., 2011.
37. **DMI.** Precipitation, evaporation, run-off and Recharge data of meteorological stations in the western Turkey, *State Meteorological Service, Ankara*, 2020.
38. **TSWCR.** Solid waste control regulation. ministry of environment and forestry of Turkey, *Official Gazette*, 2002, No. 24736, Ankara, Turkey.
39. **Emre T. and Sozbilir H.** Tectonic evolution of the Kiraz basin: Kucuk Menderes graben: Evidence for compression/Uplift related basin formation overprinted by extensional tectonics in western Anatolia, *Turkish J. of Earth Sci.*, 2007, Vol. 16. — P. 441 – 470.
40. **WMO.** River basin management project of Kucuk Menderes basin, *General Directorate of Water Management Office in Turkey, Ankara*, 2019.

Поступила в редакцию 15/XII 2021

После доработки 16/II 2022

Принята к публикации 14/III 2022