

УДК 008

Ю.В. Трофимов

История и культура исследования подземных вод: от древних цивилизаций к инновациям современности

Аннотация:

В статье представлен исторический обзор исследований подземных вод с древнейших времен до наших дней. Обсуждаются факторы, повлиявшие на исследования в области подземных вод, определяются ключевые вопросы управления подземными водами и перспективы будущих исследований. Автор описывает влияние изменения климата на ресурсы подземных вод и подчеркивает необходимость комплексного планирования управления подземными водами, включая меры по сокращению потерь воды и сохранению ресурсов.

Ключевые слова: история гидрогеоэкологии, подземные воды, грунтовые воды, экосистемы, загрязнение подземных вод, устойчивое потребление, мониторинг подземных вод, управление водными ресурсами.

Об авторе: Трофимов Юрий Владиславович, Государственный университет «Дубна», аспирант кафедры экологии и наук о Земле; эл. почта: ura_trofim@bk.ru

Научный руководитель: Галицкая Ирина Васильевна, ФГБУН Институт геоэкологии им. Е. М. Сергеева РАН, доктор геолого-минералогических наук, профессор, эл. почта: galgeoenv@mail.ru

Подземные воды – один из наиболее важных природных ресурсов, обеспечивающий питьевой водой миллионы людей во всем мире и поддерживающий многочисленные экосистемы. Этот ресурс играет решающую роль в существовании и поддержании сельского хозяйства, промышленности и производства энергии. Несмотря на свою важность, грунтовые воды часто труднодоступны для исследований, поэтому их научное изучение началось относительно недавно.

В статье представлен исторический обзор исследований подземных вод, от их самого раннего начала до наших дней. Цель исторической перспективы, рассмотренной далее – сформировать представление об изучении подземных вод от древности до наших дней, о научных, социальных и технологических факторах, повлиявших на исследования, а также о ключевых проблемах управления подземными водами и перспективах исследований будущего.

Наиболее ранние письменные упоминания об использовании подземных вод приходятся на древние цивилизации: египетскую, греческую, римскую и китайскую, а также цивилизации долины Инда в Индии. Древние египтяне строили колодцы для добычи питьевой воды и орошения земель. Они же разработали систему подземных туннелей для доступа к подземным водам. Цивилизация долины Инда использовали строительство колодцев и ирригационных систем для хранения и управления водными подземными ресурсами.

В Древней Греции большой вклад в изучение грунтовых вод внес Аристотель. Множество работ было посвящено взаимосвязи подземных вод с поверхностными водами, природе их происхождения, и связи качества подземных с расположением источника. Аристотель описывает гидрологический цикл и движение воды по земной поверхности и недрам. Философ предположил, что доступ к грунтовым водам может осуществляться через колодцы и источники, поэтому посоветовал Александру Македонскому строительство туннеля через гору для отвода воды для орошения земель. Цивилизация Древнего Китая внесла вклад в изучение подземных вод изобретениями в сфере гидротехники, в создании колодцев, каналов, систем хранения воды, методов бурения скважин с помощью бамбуковых труб и ударном бурении [6].

Во времена Римской империи строились акведуки для транспортировки воды из источников и колодцев в города и поселки. Римляне разработали методы бурения скважин с использованием буровых установок: железных и с водяным приводом. Римский философ Плиний Старший обсуждал использование колодцев и акведуков для добычи и транспортировки подземных вод для орошения и питьевых целей, описывал использование подземных каналов («канатов») для доступа к источникам подземных вод в засушливых регионах [6]. Он отмечал важность понимания геологических особенностей района для выявления потенциальных источников подземных вод и описывал методы бурения скважин с использованием ручных шнеков и ударных инструментов. Все это

предвосхитило современное понимание водного цикла, а его описание методов бурения скважин по-прежнему актуально [8].

На протяжении эпохи средневековья подземные воды использовались для орошения, промышленных процессов и в качестве источника питьевой воды. Интерес к изучению природных явлений, в том числе подземных вод, возобновился во времена эпохи Возрождения. Фокус исследований подземных вод в это время сосредотачивается вокруг их практического применения и добычи: бурения скважин и разработки ирригационных систем, благодаря чему гидрогеология оформляется в самостоятельную научную область [8].

Немецкого ученого Г. Агриколу называют отцом современной минералогии. Научный интерес исследователя лежал в области горнодобывающей промышленности. Агрикола описывал методы и технологии работы в горном деле и металлургии, зависимость успеха добычи полезных ископаемых в шахтах от гидрогеологии района, а также методы управления подземными водами с использованием насосов и дренажных систем [3, с. 43-46]. Французский математик Б. Паскаль работами по гидродинамике и изучению флюидов в движении заложил основу современного понимания потока подземных вод. Паскалем был изобретен гидравлический пресс, позволяющий сжимать воду, и открыт гидростатический парадокс: давление, оказываемое жидкостью, зависит только от глубины, а не от формы контейнера. Нельзя не упомянуть и закона Паскаля, используемый при проектировании гидравлических систем [8].

Большой вклад в гидрогеологию внес Леонардо Да Винчи. Он изучал влияние водного потока на природную среду, эрозию горных пород и образование каньонов и долин, особенности разрушения горных пород водными потоками, их истощения и формировал модели потока. Результатом стало проектирование машин для добычи и распределения подземных вод, изобретение метода бурения скважин с помощью нескольких версий водяного винта, в том числе портативного – для орошения полей. Бур достигал глубин, которые раньше достичь было невозможно. Научные достижения Да Винчи были оценены только в XIX в., а его открытия стали основополагающими для современных методов бурения [3, с. 46].

Э. Мариотт и Э. Галлей исследовали проникновение воды в землю. Мариотт известен работой о взаимосвязи между давлением и объемом в газах – законом Мариотта. Он описал, что источники – результат накопления и давления воды в подземных полостях,

которые затем находят путь к поверхности, описывал специфику прохождения подземных вод через разные виды почв и пород, влияние поверхностных особенностей, а также способность подземных вод перемещаться как горизонтально, так и вертикально. Разработка измерительного прибора «водный баланс» стала одним из первых случаев применения системы мониторинга подземных вод. Впервые выносятся тезис о конечности подземных вод как ресурса и загрязнения из-за человеческого фактора [1, с. 28-39]. Работы Галлея помогли улучшить понимание поведения подземных вод и наметили путь для дальнейших исследований и технологических достижений в области гидрологии [6].

В XVIII в. отдельные области гидрогеологии начинают становление как научные направления. Ключевыми фигурами этого периода стали А. Дарси и Л. Эйлер. Французским инженером Дарси разработана концепция гидравлической проводимости, описывающая способности почвы или породы передавать воду. Швейцарским математиком Эйлером разработана математическая модель стока подземных вод, основанная на принципах механики жидкости. Модели Эйлера применялись в области машиностроения и сельского хозяйства, однако и сегодня широко используются в области гидрогеологии [1].

К началу XX в. исследования подземных вод обретают междисциплинарный характер и охватывают гидрологию, геологию, науку об окружающей среде и инженерию. Работы У. Смита, Г. Дарси, Ч. Лайелла стали основой современного понимания структуры Земли и поведения воды под землей. Во второй половине XIX в. использование технологии бурения начало трансформировать область гидрогеологии. Первые глубокие скважины были пробурены в Европе и США, что позволило проводить исследования на гораздо больших глубинах, чем ранее. Это привело к новым открытиям о поведении подземных вод в различных геологических условиях и разработке новых методов управления ресурсами подземных вод [4, с. 56-59].

Пионером современных исследований подземных вод стал американский гидролог К. Тайс, разработавший первую количественную модель стока подземных вод в водоносных горизонтах. Эти работы впоследствии стали фундаментом разработки компьютерных моделей для моделирования потока подземных вод. Французский инженер Ш. Дюпуи расширил работу Дарси и разработал уравнения для расчета гидравлической проводимости водоносных горизонтов [6]. Дюпуи создал математическую модель стока подземных вод, учитывающую влияние пористости и проницаемости на движение воды

через почву и горные породы. Ученый заложил теоретическую основу анализа потока подземных вод в замкнутых водоносных горизонтах и предложил метод оценки параметров водоносного горизонта на основе испытаний на перекачку [6].

У. Смит, «отец английской геологии», впервые создал геологическую карту Англии и Уэльса. Вклад Смита стал основой для современного геологического картографирования, расширивший область знаний стратиграфии и использования окаменелостей в современных слоях горных пород. Ч. Лайель стал основоположником современной геологии. Он одним из первых указал на то, что давление в артезианских скважинах обусловлено удержанием воды в слоях непроницаемой породы [11]. Немецкий геолог Г. фон Ноймайер создал метод измерения уровня грунтовых вод с помощью перевернутой стеклянной трубки, разработал теорию стока подземных вод на принципах гидравлики. Ученый применил ее к проблеме осушения болот и предотвращения наводнений, проводил исследования стратиграфии и минералогии Баварских Альп.

Французский химик Л. Пастер раскрыл понимание микробных процессов, происходящих в подземных водах, доказав решающую роль микроорганизмов в разложении органического вещества в воде и вредоносное влияние некоторых бактерий для здоровья человека. Исследователь продолжил изучение процессов очистки природных источников воды с помощью фильтров, устраняющих вредные бактерии [10; 17]. Пастер создал метод очистки воды с использованием квасцов, чем помог снизить заболеваемость болезнями, передающимися через воду.

На западе США геолог Дж. Пауэлл развивал научный интерес к управлению подземными водами для устойчивого использования. В работе «Доклад о землях засушливого региона Соединенных Штатов» он описывает водные ресурсы и ирригационный потенциал засушливых земель на западе Соединенных Штатов, дав толчок к пропаганде создания национальных парков и охраняемых районов для сохранения водных ресурсов и обеспечения их устойчивого использования [17].

Значительный прогресс в XX в. был достигнут в исследовании и понимании подземных вод. В развитие науки о подземных водах вносили свой вклад гидрологи, геологи, химики и инженеры. Прорывом в это время становится развитие геофизики. Геофизические методы, такие как визуализация электрического сопротивления и сейсмическое отражение, позволили составить карту подповерхностной геологии и идентифицировать подземные водоносные горизонты. Развитие технологий

дистанционного зондирования, таких как спутниковые снимки, позволило обнаруживать и контролировать ресурсы поверхностных и подземных вод [5, с. 97-101].

В начале 1900-х гг. вводится понятие гидравлической проводимости, описывающее способность материала передавать воду. Благодаря ей, наряду с разработкой математических моделей и компьютерного моделирования, стало возможно прогнозирование и управление стоком подземных вод. Развитие передовых технологий очистки воды, таких как обратный осмос и процессы окисления, позволяют обрабатывать загрязненные подземные воды для повторного использования, а для управления и восстановления водных ресурсов были разработаны такие методы, как моделирование подземных вод, искусственное подпитывание и технологии восстановления [15].

Растущая обеспокоенность истощением и загрязнением подземных вод промышленностью, добычей полезных ископаемых, пестицидами и удобрениями сельского хозяйства влечет за собой появление экологических норм и политики во многих странах. Принимается закон о безопасной питьевой воде, который установил стандарты качества питьевой воды, включая грунтовые воды [7]. Была признана критическая важность экосистем подземных вод. По мере того, как человечество вступало в XXI в., все больше внимания уделялось вопросам необходимости дальнейших исследований и стратегии управления для обеспечения устойчивого использования и защиты ресурсов подземных вод для будущих поколений [17].

Так, гидрологом В. Кшижем была разработана концепция пополнения подземных вод в рамках исследований карстовых регионов южной Польши и окружающих стран. Кшиж сыграл ключевую роль в разработке политики управления подземными водами в Польше и призвал к обеспечению их долгосрочной защиты [8]. На западе Соединенных Штатов подземные воды исследовались гидрологом О. Майнзером. Разработка метода численного моделирования движения подземных вод через пористые среды произвела революцию в изучении подземных вод. Майнзер разработал математическую модель для прогнозирования миграции загрязняющих веществ в подземных водах. Это позволило создавать эффективные стратегии восстановления ресурсов [6].

Современные исследования подземных вод охватывает широкий спектр дисциплин: гидрологию, геологию, науку об окружающей среде, химию, инженерию. Междисциплинарная специфика исследований привела к новому пониманию поведения

систем подземных вод и появлению новых методов их управлением и сохранением [11]. Наиболее интенсивное развитие в этом контексте получили следующие направления:

1) разработка численных моделей, имитирующих поведение систем подземных вод на основе математических уравнений для описания потока воды через пористые материалы, такие как песок, гравий и камень. С помощью компьютеров ученые моделируют сценарии и прогнозируют поведение систем подземных вод в различных условиях [17];

2) разработка новых методов измерения подземных вод и мониторинга их поведения. Дистанционное зондирование, геофизическая визуализация и сенсорные сети позволили получить подробную информацию о системах подземных вод без необходимости проведения обширных полевых работ [9, с. 486-490];

3) разработка стратегий устойчивого управления для защиты и сохранения ресурсов подземных вод. Это направление только продолжает усиливаться по мере осознания человечеством последствий антропогенного воздействия на ресурсы подземных вод [14];

4) технологии для устойчивого управления ресурсами подземных вод, обеспечения их доступности для будущих поколений [7].

Значительным достижением стало использование методов дистанционного зондирования. С помощью спутниковых снимков, аэрофотосъемки и данных LiDAR (Light Detection and Ranging) идентифицируются районы с истощением или загрязнением подземных вод, а уровень и качество контролируется с помощью спутниковой радиолокационной альтиметрии и гравитационных измерений. Эти данные позволяют оперативно отслеживать изменения в подповерхностном хранилище воды [9].

С помощью геофизических методов высокого разрешения: томографии с электрическим сопротивлением (ERT) и георадаров (GPR) проводится неинвазивная визуализация недр и сбор информации о распределении подземных вод и загрязняющих веществ [11, с. 11-17]. ERT используется для картирования электропроводности недр, часто отражающей изменения влажности почвы и содержание грунтовых вод. Георадар с помощью радиолокационных волн получает изображения недр и создает изображения почвы и горных пород в высоком разрешении.

Использование искусственного интеллекта (ИИ) и машинного обучения (МО) в мониторинге и моделировании подземных вод помогают определить потенциальные

источники загрязнения, предсказать уровень и качество подземных вод и оптимизировать стратегии управления подземными водами [9]. Методы и инструменты, появившиеся в XXI в., помогают в предоставлении информации лицам, управляющим водными ресурсами, обеспечивая более эффективное управление и защиту.

Одной из наиболее острых проблем сегодня становится нехватка питьевой воды. Решения ученых в этой связи сконцентрированы на инновационном подходе искусственного пополнения и хранения подземных вод. Искусственное подпитывание – намеренное добавление воды в водоносный горизонт для увеличения количества подземных вод и предотвращения истощения естественных источников. Наполнение, как правило, осуществляется через инфильтрационные бассейны, нагнетательные скважины или водоемы. Кроме того, возможна закачка воды в подпиточный бассейн или скважину, а также в естественные хранилища: подземные пещеры, истощенные нефтяные и газовые резервуары. Для подпитки в некоторых случаях используются очищенные сточные или ливневые воды [13; 12]. Такой подход успешно реализовали водные агентства Калифорнии, создавшие подземные водные хранилища на период засухи [16]. Банк водных подземных ресурсов предназначен для высвобождения во время нехватки или природных катаклизмов, например, засух.

Растущий спрос на водные ресурсы с изменением климата оказал огромную нагрузку на ресурсы подземных вод, ускорил их изучение и разработку подходов к управлению. Скорость пополнения подземных вод снижается во многих регионах из-за уменьшения количества осадков и повышения температуры, что снижает доступность водных подземных ресурсов [1]. Изменение климата влияет на качество ресурсов, меняя химические и физические характеристики подземных вод. Наконец, следует отметить необходимость комплексного планирования управления подземными водами [2, с. 110-111]. Планирование должно учитывать конкурирующие потребности в водных ресурсах сельскохозяйственных, промышленных и бытовых пользователей, а также экологические потребности экосистем, зависящих от грунтовых вод [2, с. 112]. Необходимым элементом эффективного плана управления подземными водами должны стать меры по сокращению потерь воды и сохранению водных ресурсов.

Библиографический список:

1. Жарков А. А. Гидрогеология: история и перспективы развития. М.: Геос, 2018. 320 с.
2. Захаров А. С. Гидрогеология: проблемы и перспективы. Luxembourg: Springer, 2017. 280 p.
3. Кораблин А. В. История гидрогеологии в России и мире. М.: Научный мир, 2014. 404 с.
4. Подвальная Н. В. Гидрогеология и инженерная геология: история, теория и практика. М.: Издательский дом «Лань», 2017. 357 с.
5. Подвальная Н. В. Гидрогеология: история развития и современное состояние науки. М.: Издательский дом «Лань», 2015. 375 с.
6. Alley W. Historical development of groundwater hydrology // Groundwater. 2011. Vol. 49, No. 2. Pp. 165-177.
7. Alley W. Sustainability of groundwater resources / W. Alley, T. Reilly, O Franke // US Geological Survey Circular. 1999. Vol. 1186. Pp. 79-81.
8. Clark I. Groundwater: The past and future of a critical resource // Hydrogeology Journal. 2013. Vol. 21, No. 1. Pp. 229-238.
9. Fetter C. W. Applied hydrogeology. Pearson: Pearson College Div, 2000. 598 p.
10. Freeze R. Groundwater / R. Freeze, J. Cherry. New Jersey: Prentice-Hall. 1979. 624 p.
11. Jmal I. Assessment of groundwater vulnerability using a specific vulnerability method: Case of Maritime Djefara shallow aquifer [Electronic resource] / I. Jmal, B. Ayed, S. Sahal et al. // Arabian Journal of Geoscience. 2017. Vol. 10. Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12517-017-3035-8> (accessed date: 11.03.2023).
12. Leake S. Groundwater: A global resource. New Jersey: Wiley, 2012. 520 p.
13. Scanlon B. Groundwater depletion and sustainability of irrigation in the US High Plains and Central Valley // Proceedings of the National Academy of Sciences. 2021. Vol. 109, No. 24. Pp. 9320-9325.
14. Taylor R. Ground water and climate change // Nature Climate Change. 2013. Vol. 3, No. 4. Pp. 322-329.

15. Todd D. Groundwater hydrology. Chichester: John Wiley & Sons, 2005. 450 p.
16. Vengosh A. Groundwater quality and quantity challenges in the United States // Current Opinion in Environmental Science & Health. 2018. Vol. 2. Pp. 16-23.
17. Winter T. Ground Water and Surface Water: A Single Resource. Denver, Colo.: U.S. Geological Survey, 1998. 79 p.

Trofimov Yu. V. **History and culture of groundwater research: from ancient civilizations to modern innovations**

This article provides a historical overview of groundwater research from ancient times to the present day. It discusses key issues in groundwater management and future research perspectives. The article emphasizes the impact of climate change on groundwater resources, and the need for integrated planning and measures to conserve water resources.

Keywords: history of hydrogeoecology, groundwater, groundwater, ecosystems, groundwater pollution, sustainable consumption, groundwater monitoring, water resources management.