

УДК 556.3

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2023-63-4-110-126

## РЕТРОСПЕКТИВНЫЙ АНАЛИЗ МНОГОЛЕТНИХ КОЛЕБАНИЙ УРОВНЕЙ ВОДЫ В ДОКУЧАЕВСКОМ КОЛОДЦЕ В КАМЕННОЙ СТЕПИ

Сергей Павлович Поздняков<sup>1✉</sup>, Валерия Вячеславовна Ведяшкина<sup>2</sup>,  
Елена Александровна Филимонова<sup>3</sup>, Надия Ивановна Позднякова<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; spozd@mail.ru✉

<sup>2</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; vedyashkina.valera@mail.ru

<sup>3</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; ea.filimonova@yandex.ru

<sup>4</sup>Воронежгеомониторинг, филиал АО «Центральное ПГО», Воронеж, Россия; voronezh@rusgeology.ru

**Аннотация.** Анализируются многолетние и внутригодовые колебания уровня грунтовых вод в заповеднике Каменная Степь в Воронежской области по данным мониторинга Докучаевского колодца. Этот колодец является уникальным пунктом мониторинга грунтовых вод с наиболее длинным периодом наблюдений в России и Европе, составляющих уже 130 лет. Особенность формирования подземных вод четвертичного горизонта, который каптирует колодец, состоит в том, что внутригодовой и многолетний режим уровней грунтовых вод определяется динамикой инфильтрационного водообмена между подземными водами и поверхностью. Проведенный анализ основан на обширном фактическом материале включая многолетние ряды гидрогеологических наблюдений и базу метеорологической данных. Использован комплекс методов и подходов: статистические методы, корреляционный анализ, расчеты водного баланса по программе SURFBAL и др.

По результатам кросскорреляционного анализа уровней воды в колодце и других наблюдательных скважин на четвертичный горизонт выявлено, что Докучаевский колодец является репрезентативным пунктом наблюдений для оценки закономерностей колебаний уровней грунтовых вод в Каменной Степи. На основе анализа временных рядов выявлено, что наблюдаемая динамика уровня воды в колодце наследует в многолетнем разрезе ход основных режимобразующих факторов — осадков и потенциальной эвапотранспирации, определяющих профицит или дефицит влаги для формирования инфильтрационного питания. С динамикой именно этих факторов связано отмечаемое в последние 15 лет экстремальное снижение уровней воды в колодце вплоть до его частичного осушения в 2020–2022 гг. На основе модельных исследований показано, что постепенно происходит трансформация внутригодового режима колебаний уровня воды в колодце в конце XX и начале XXI века по сравнению с серединой XX века в связи с изменениями условий весенне-зимнего впитывания влаги с поверхности земли и формирования инфильтрационного питания. Однако она не так существенна, как, например, трансформация гидрографов рек в бассейне Дона.

**Ключевые слова:** уровень грунтовых вод, инфильтрационный водообмен, осадки, потенциальная эвапотранспирация, корреляция

**Для цитирования:** Поздняков С.П., Ведяшкина В.В., Филимонова Е.А., Позднякова Н.И. Ретроспективный анализ многолетних колебаний уровней воды в Докучаевском колодце в Каменной Степи // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2023. С. 110–126.

## RETROSPECTIVE ANALYSIS OF LONG-TERM GROUNDWATER LEVEL FLUCTUATIONS IN DOKUCHAEV PIT

Sergey P. Pozdniakov<sup>1✉</sup>, Valeria V. Vedyashkina<sup>2</sup>, Elena A. Filimonova<sup>3</sup>,  
Nadiya I. Pozdniakova<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; spozd@mail.ru✉

<sup>2</sup>Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; vedyashkina.valera@mail.ru

<sup>3</sup>Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; ea.filimonova@yandex.ru

<sup>4</sup>Voronezh geomonitoring, Voronezh, Russia; voronezh@rusgeology.ru

**Abstract.** We analyze long-term and annual groundwater level fluctuations in the Kamennaya Steppe Nature Reserve in Voronezh Region based on monitoring data from the Dokuchaev pit. This pit is a unique groundwater monitoring site with the longest observation period in Russia and Europe, amounting to 130 years. The specific feature of groundwater formation of the Quaternary horizon, which captures the pit is that the annual and multi-year regime of groundwater levels is determined by the dynamics of infiltration water exchange between groundwater and the surface. The analysis is based on an extensive factual record, including long-term series of hydrogeological observations and meteorological database. A set of methods and approaches was used: statistical methods, correlation analysis, SURFBAL water balance calculations, etc.

Cross-correlation analysis of water levels in the pit and other observation wells on the Quaternary horizon revealed that the Dokuchaev pit is a representative observation point to assess the patterns of fluctuations in groundwater levels in the Kamennaya Steppe. Based on the analysis of time series it was found that the observed dynamics of water

level in the pit follows the course of the main regime-forming factors — precipitation and potential evapotranspiration, determining the excess or deficit of moisture for infiltration in a multi-year framework. Extreme decrease of water level in the pit to its partial drying in 2020–2022, observed during last 15 years, relates to dynamics of these factors. Based on model studies, it is shown that there is a gradual transformation of annual regime of fluctuations of water level in the pit in the late 20<sup>th</sup> and early 21<sup>st</sup> century compared with the mid-20<sup>th</sup> century due to changes in conditions of spring-winter absorption of moisture from the surface of the earth and the formation of infiltration feeding. However, it is not as significant as, for example, the transformation of river hydrographs in the Don basin.

**Keywords:** groundwater level, recharge exchange, precipitation, potential evapotranspiration, correlation

**For citation:** Pozdniakov S.P., Vedyashkina V.V., Filimonova E.A., Pozdniakova N.I. Retrospective analysis of long-term groundwater level fluctuations in Dokuchaev pit. *Moscow University Geol. Bull.* 2023; 4: 110–126. (In Russ.).

**Введение.** Докучаевский колодец — шурф № 1 находится на северо-востоке Воронежской области в пределах особо охраняемой природной территории (ООПТ) «Каменная Степь». Изучение агропотенциала этого района началось еще в конце XIX экспедицией под руководством В.В. Докучаева. ООПТ «Каменная Степь» была создана как опытный полигон для комплексной оценки воздействия человека на природный ландшафт и для выбора рациональных вариантов ведения сельского хозяйства в степной зоне. Исследованиями на этом полигоне более века занимаются специалисты разного профиля: почвоведы, ботаники, географы, геологи и гидрогеологи, климатологи, агрономы, и многие другие [Зборищук, Турусов, 2019; Корабельников и др., 2009; Харченко и др., 2014; Хитров, Чевердин, 2016]. Такой междисциплинарный интерес к ООПТ «Каменная Степь» вызван, во-первых, природно-климатическими особенностями этого региона распространения русских черноземов с изменяющимися климатическими условиями и частыми повторениями засух; во-вторых, длительной, 130-летней историей комплексного ее изучения и наблюдений; в-третьих, в Каменной Степи прослеживается многолетнее влияние антропогенного воздействия на естественный природный ландшафт и его переход в агроландшафт.

Наблюдательный пункт за уровнем грунтовых вод — шурф № 1 был заложен в 1892 г. во время упомянутых экспедиционных работ В.В. Докучаева. К настоящему времени по этому пункту накоплен кондиционный 130-летний ряд практически непрерывных наблюдений за уровнем воды в нем, являющимися, по-видимому, самым длинным рядом не только на территории России, но и Европы в целом. Этот ряд формируется не только за счет многолетней и внутригодовой изменчивости естественных режимообразующих фактов, но и под влиянием антропогенеза на динамику уровня грунтовых вод. Причем именно здесь в Каменной Степи могут проявиться два совершенно разных, важных масштаба антропогенеза. Региональный масштаб определяется многолетними преобразованиями первоначального степного ландшафта в лесостепной агроландшафт. Глобальный масштаб связан с климатическими изменениями, начавшимися во второй половине XX в.

В связи с этим цель настоящей работы — анализ многолетней и внутригодовой изменчивости уровня

воды в Докучаевском колодце, как показателя динамики инфильтрационного водообмена грунтовых вод на территории Каменной степи в условиях климатических изменений.

История изучения Каменной степи связана с сильной засухой, разразившейся в конце XIX в европейской части России. В.В. Докучаев начал разрабатывать проекты, направленные на ликвидацию негативных последствий засухи, на ведение хозяйства в ее условиях и прогнозирование устойчивого развития аграрного сектора. Каменная степь была выбрана им как экспериментальный экспедиционный район, представительный для достаточно большой территории центрального Черноземья, где распространены уникальные плодородные почвы — русские черноземы. В 1892–1898 гг. под руководством В.В. Докучаева в Каменной степи поставлен долговременный эксперимент по защите степного земледелия от катастрофических бурь и засух путем формирования оптимизированного южно-лесостепного агроландшафта, заключавшиеся в создании защитных лесных полос и систем каскадных прудов.

В рамках этого эксперимента начались наблюдения за уровнем грунтовых вод путем сооружения в 1892 г. двух колодцев-шурфов. В том же году были организованы метеонаблюдения, продолжающиеся до настоящего времени на метеостанции Каменная степь. В 1893 г. вокруг шурфа № 1 заложен участок дубового леса и начаты работы по изучению поверхностного стока. В 1894 г. посажены первые лесополосы, в 1907–1908 гг. работы по созданию лесополос были приостановлены. Однако сильнейшая засуха 1911 г., аналогичная засухе 1891 г., вынудила правительство обратиться к опыту В.В. Докучаева по борьбе с засухой и уже летом 1911 г. была вновь создана Каменно-Степная опытная станция имени В.В. Докучаева [Рыбальский, Муравьева, 2021]. С тех пор мониторинг и посадка лесополос продолжают до настоящего времени. Считается, что на территории заказника лесные полосы играют ключевую роль: уменьшают активность эрозионных процессов, регулируют уровень подземных вод, перераспределяют поверхностный сток, формируют особый тип почвообразовательного процесса, преобразовывают микроклимат прилегающих территорий, существенно повышают биологическое разнообразие экосистем и увеличивают биомассу [Барабанов, Панов, 2016; Харченко и др., 2014; zapovednik-vrn.ru].

Для стационарных сельскохозяйственных исследований Каменной Степи в 1946 г. на ее территории был создан Научно-исследовательский институт земледелия ЦЧП имени В.В. Докучаева, который в 1956 г. был реорганизован в НИИ сельского хозяйства ЦЧП имени В.В. Докучаева. В 1996 г. ООПТ «Каменная степь» придан статус федерального заказника, охрану которого осуществляет Федеральное государственное учреждение «Воронежский государственный природный биосферный заповедник» [mnr.gov.ru].

В 1937 г. была организована Каменно-Степная гидрологическая станция балансового типа. В 1959 г. эта станция получила название Гидрогеологическая станция ЦЧП, а в 1972 г. она была расформирована. Участок этой станции с образованным на его базе гидрогеологическим отрядом вошел в состав Гидрорежимной экспедиции МинГео СССР с образованием опорного гидрогеологического полигона «Каменная Степь». Затем в 1989 г. он передан Геологическому управлению «Воронежгеология» [Корабельников и др., 2009]. С 1995 г. полигон «Каменная Степь» входит в состав Воронежского территориального центра государственного мониторинга геологической среды (ТЦ Воронеж-Геомониторинг). За этот длительный период изучения территории Каменной степи количество наблюдательных пунктов на полигоне менялось, достигая максимума в середине 1950-х годов до 256 пунктов, но шурф № 1 всегда оставался в составе наблюдательной сети. В 1977 г. он включен в список исторических памятников Воронежской области под названием «Докучаевский колодец» [Корабельников и др., 2009]. В настоящее время под наблюдением на опорном полигоне «Каменная Степь» 58 пунктов, включая «Докучаевский колодец».

**Природные условия.** ООПТ «Каменная Степь» находится в Таловском районе на северо-востоке Воронежской области, в 12 км южнее районного центра поселка городского типа Таловая, в пределах водораздела рек Чиглы и Елани, в области Южного Битюгско-Хоперского физико-географического района. Отличительными чертами земной поверхности является ее сильная расчлененность долинами рек и оврагов и значительные колебания высот на водоразделах и в долинах. Максимальные абсолютные отметки водоразделов достигают 200 м, минимальные приурочены к пойме р. Чигла в северо-западной части территории и имеют отметки 102–110 м. Гидрографическая сеть Каменной Степи представлена двумя реками (Таловая и Н. Чигла) и системой искусственных водоемов. Поверхность района работ изрезана многочисленными балками и их притоками: б. Таловая, б. Озерки, б. Осинковая и другие. Общая площадь этого агроландшафтного заказника составляет 5232 га и включает лесные насаждения (473 га — 9,0%), водные угодья, (92 га — 1,8%), сельскохозяйственные земли (4123 га — 78,8%), залежи (54 га — 1,0%), прочие земли (490 га — 9,4%) [zapovednik-vrn.ru].

Климат района континентальный, с большими колебаниями температуры, которая зимой опускается до  $-30^{\circ}\text{C}$ , а летом поднимается до  $+40^{\circ}\text{C}$ . Среднегодовая температура равна  $+5,7^{\circ}\text{C}$ . Каменная Степь расположена в зоне недостаточного увлажнения. В среднем за год выпадает около 470 мм осадков, но распределяются они год от года и в течение года весьма неравномерно, количество осадков может составить от 50 до 150% среднегодовой нормы [Зборищук, Турусов, 2019]. Снежный покров сохраняется в течение 100 и более дней, средняя его высота в поле составляет 15–20 см, в лесополосах и балках она увеличивается до 1 м и более. Каменная степь по своему географическому положению с относительно равнинным открытым рельефом является территорией сильно подверженной ветрам.

В почвенном отношении территория Каменной Степи находится на границе Окско-Донской провинции умеренно промерзающих черноземов лесостепи и серых лесостепных почв и южнорусской провинции теплых промерзающих черноземов степи Центральной лесостепной и степной почвенно-биоклиматической области. В связи с этим почвенный покров территории имеет переходный характер и отличается значительной сложностью и контрастностью [zapovednik-vrn.ru]. В Каменной Степи выделена 61 почвенная комбинация, наибольшее распространение получили черноземы с высоким содержанием гумуса, которые покрывают водоразделы и пологие склоны, к крутым склонам приурочены аллювиально-делювиальные почвы, в микропонижениях рельефа распространены солонцеватые черноземы и типичные солонцы [Хитров, Чевердин, 2016].

**Геологическое строение и гидрогеологические условия.** Геологическим строением территории Каменной Степи, закономерностями формирования грунтовых вод, изменениями их уровня, температуры и химического состава в разные годы занимались Г.Ф. Басов, В.А. Иванов, В.А. Коробейников, Н.Н. Луцкихина, В.Н. Семихатова, Е.А. Середин, К.И. Шумилин, Н.П. Шумилина и др. [Корабельников и др., 2009].

Территория ООПТ «Каменная степь» находится в пределах центральной части Воронежской антеклизы. В геологическом строении района принимают участие два структурных этажа: кристаллический фундамент архей-протерозойского возраста и залегающий несогласно на нем осадочный чехол, представленный породами девонской, меловой, палеогеновой и четвертичной систем [Корабельников и др., 2009; Трегуб, 2002]. Четвертичные отложения распространены повсеместно и включают доледниковые, ледниковые и послеледниковые. Северо-западнее территории полигона проходило основное русло древнего доледникового потока, выполненное песчано-глинистыми отложениями аллювиально-озерного генезиса, залегающими на размытой поверхности палеогеновых и меловых

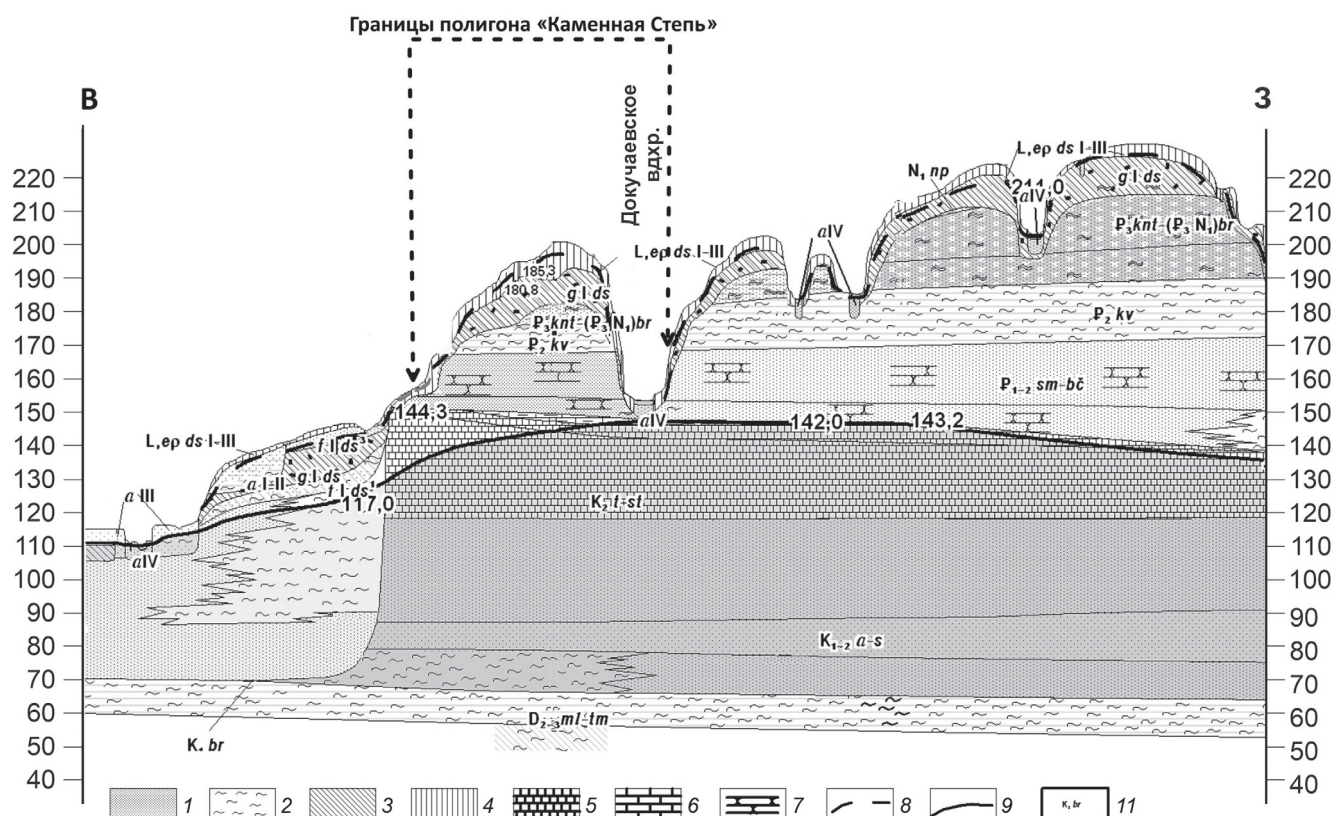


Рис. 1. Схематический гидрогеологический разрез района размещения полигона «Каменная Степь» по данным [Корабельников и др., 2009] с дополнениями авторов. (масштаб: горизонтальный 1:300 000): 1 — пески, 2 — глины, 3 — суглинок, 4 — суглинок лессовидный, 5 — мел, 6 — известняк, 7 — песчаник, 8 — уровень грунтовых вод, 9 — уровень подземных вод дочетвертичных отложений, 11 — индекс гидрогеологического подразделения

пород. Ледниковые отложения на территории полигона широко распространены в виде морены, представленной валунными суглинками и супесями с линзами и прослоями песка, общей мощностью до 16 м. Последледниковые отложения над кровлей морены имеют преимущественно озерно-болотный и аллювиальный характер, выше они сменяются лессовидными и покровными суглинками. Общая мощность четвертичных отложений на территории гидрогеологического полигона «Каменная Степь» достигает 25 м на водораздельных пространствах.

На территории полигона подземные воды вскрыты скважинами в четвертичных, меловых, девонских и протерозойских отложениях. В гидрогеологическом отношении зона активного водообмена в этом районе имеет выраженное двух ярусное строение (рис. 1). Верхний ярус представлен водоносными горизонтами и комплексами в четвертичных отложениях. В частности, на территории полигона — это локально слабоводоносный донской ледниковый комплекс (*gl-Ilds*) ниже-среднечетвертичного возраста. На большей территории полигона «Каменная Степь» в наблюдательных скважинах, в том числе и в Докучаевском колодце, ведется многолетний мониторинг уровней грунтовых вод именно этого элемента гидрогеологического разреза [Корабельников и др., 2009]. Подземные воды комплекса вскрываются на отметках 170–190 м, питают-

ся за счет локальной инфильтрации, а разгружаются в эрозионных врезках и за счет перетекания вниз.

Нижний ярус — это комплекс межпластовых горизонтов в песчано-глинистых неогеновых отложениях, карбонатных отложениях турон-коньякского возраста и апт-сеноманских терригенных песках. Наиболее водообильным является апт-сеноманский водоносный горизонт, представленный песками мощностью около 50 м. Воды напорные, высота напора над кровлей равна 3–12 м. Абсолютные отметки пьезометрической поверхности апт-сеноманского горизонта составляют от 100 м в долинах рек до 140 м на водораздельных пространствах (рис. 1), то есть расположены на отметках, существенно ниже, чем отметки уровня грунтовых вод, и даже ниже, чем подошва моренных отложений. Согласно региональному гидрогеологическому разрезу, приведенному на рис. 1, уровни в апт-сеноманском водоносном горизонте оторваны от ниже-среднечетвертичного водоносного комплекса. Следовательно, гидрогеодинамическое взаимоотношение этих двух ярусов гидрогеологического разреза — это связь грунтового и безнапорного межпластового водоносных горизонтов, формирующаяся нисходящим перетеканием. При этом гидрогеодинамическое влияние безнапорного межпластового пласта на грунтовой водоносный горизонт отсутствует за счет разрыва сплошности потока ниже границы четвертичных отложений.

Далее при анализе мониторинга для верхнего яруса будем использовать наименование четвертичный горизонт, а для нижнего — меловой горизонт.

**Исходные данные и методы их анализа.** В качестве исходных данных использовались фактические ряды мониторинга уровней подземных вод и метеорологических условий. Вся режимная сеть опорного полигона «Каменная Степь» является государственной опорной наблюдательной сетью (ГОНС). На территории полигона за длительный период наблюдений количество наблюдательных пунктов изменялось, но при этом существуют скважины и шурфы с длительными (десяtkи лет) данными мониторинга уровней. В результате выбора наиболее продолжительных рядов были отобраны фактические данные по 13 скважинам и шурфам протяженностью от 130 лет для Докучаевского колодца и более коротких рядов с протяженностью не менее 25.

Основной режимный ряд уровней грунтовых вод для анализа — это ряд наблюдений в Докучаевском колодце (пункт наблюдений по Государственному Водному Кадастру — ГВК 20109181). Он имеет координаты 51°01′31,2″ с.ш. и 40°41′51,9″ в.д., его абсолютная отметка 186,46 м. Колодец находится в середине лесного массива Каменной Степи № 69. В момент сооружения в 1892 г., согласно архивным материалам, его глубина была 10 м. Сейчас по фактическим замерам глубина колодца составляет 8–8,05 м. В настоящее время на поверхности расположен деревянный сруб колодца, а ниже уровня земли его стенки выполнены бетонными кольцами диаметром 0,8 м, так что водообмен его с грунтовыми водами идет, видимо, в основном через дно. Согласно паспорту ГВК ниже почвенного покрова разрез колодца достаточно монотонный и представлен до глубины 10 м суглинками донского ледникового комплекса (gI-II<sub>ds</sub>), причем первые два метра — это водно-ледниковые отложения, а ниже залегает морена.

Результаты мониторинга отметок воды в колодце на уровне среднегодовых данных доступны, начиная с 1893 г., а на уровне срочных замеров с 1940 г. В среднегодовых данных есть пропуск в 1937–1939 гг. Срочные замеры имеют различную частоту от одного раза в трое суток до трех раз в месяц.

В 2022 г. авторами была выполнена попытка оценки коэффициента фильтрации пород на уровне дна колодца путем экспресс-налива. Результаты этого налива имеют качественный характер, так как дно колодца перед началом налива было сухое. Однако возмущение в виде мгновенного подъема уровня над дном колодца примерно на 1 м релаксировалось менее, чем за сутки. Это свидетельствует, что коэффициент фильтрации в районе отметок дна имеет порядок не менее десятых долей метра в сутки, а сам колодец не искажает природные внутригодовые природные колебания уровня грунтовых вод за счет инерционности.

Многолетние и внутригодовые колебания осадков, температур и скоростей ветра на уровне рядов суточного разрешения получены из метеорологической базы данных для метеостанции Каменная Степь (индекс ВМО 34139, координаты 51°03′ с.ш.; 40°42′ в.д.) [<http://meteo.ru/data/162-temperature-precipitation#описание-массива-данных>]. Для оценок суммарного испарения в районе расположения колодца, полученного дистанционными методами за последние 20 лет, использовались результаты проекта MODIS [Mu et al., 2011].

Методика исследований состояла в применении комплекса методов выявления закономерностей многолетних и внутригодовых колебаний уровня воды в колодце и оценки его связи с режимообразующими характеристиками. На первом этапе был выполнен кросс-корреляционный анализ наблюдений во всех выбранных 13 пунктах мониторинга для оценки однотипности закономерностей колебаний уровней подземных вод и представительности Докучаевского колодца, как пункта наблюдений, характеризующих грунтовые воды Каменной Степи. Для анализа связи многолетних колебаний уровней воды в колодце с основными режимообразующими факторами, влияющими на инфильтрационный водообмен, рассматривались ряды наблюденных осадков и расчетной потенциальной эвапотранспирации. Последняя рассчитывалась по имеющимся метеоданным и данным о динамике развития растительности по модели Шаттлворта-Воланса [Shuttleworth, Wallace, 1985] в программе SURFBAL [Гриневский, Поздняков, 2010]. Для выявления закономерностей многолетних колебаний уровня и его связи с осадками и потенциальной эвапотранспирацией использовался тренд анализ, анализ разностных интегральных кривых, кросс-корреляционный анализ и построение регрессионной модели, связывающей уровень текущего года с уровнем, осадками и потенциальной эвапотранспирацией предыдущего года.

Для анализа закономерностей внутригодовых колебаний уровня применялась интерполяция данных мониторинга исходного временного ряда наблюдений в колодце на равномерную суточную сетку с последующей декомпозицией на многолетних и сезонный хода уровня. Отклонения от многолетнего хода, то есть внутригодовой гидрограф уровня использовались для оценки величины среднемноголетнего инфильтрационного питания по колебаниям уровня. Для выявления связи внутригодового гидрографа уровня в колодце с наблюдаемыми климатическими изменениями проводился сравнительный анализ этого гидрографа, полученного для двух периодов его осреднения — на середину XX в. и на конец XX в. — начало XXI в.

**Результаты. Многолетние колебания уровня в Докучаевском колодце и режимообразующих факторов. Колодец, как репрезентативный пункт мониторинга уровня грунтовых вод.** На рис. 2 показана карта пунктов мониторинга подземных вод,



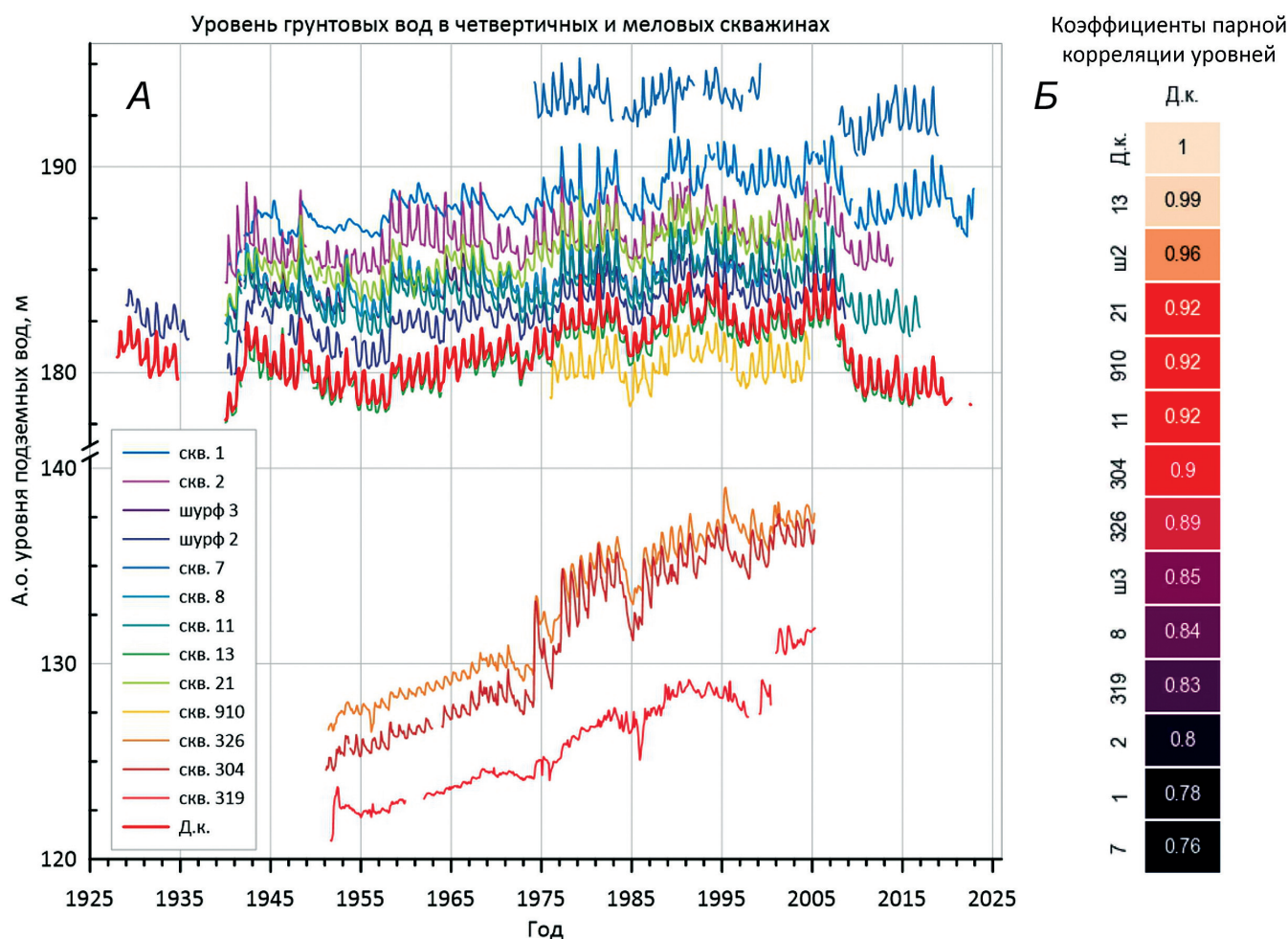


Рис. 3. А — многолетняя динамика наблюдаемых уровней подземных вод в четвертичном и меловом водоносных горизонтах; Б — коэффициенты парной корреляции уровней в скважинах с уровнем в Докучаевском колодце (Д.к.)

имеющих наиболее длительную историю наблюдений за уровнями воды в четвертичном водоносном и меловом горизонтах. Скважины, вскрывающие четвертичные отложения, располагаются в основном на водораздельном пространстве. Меловые скважины располагаются как у Докучаевского водохранилища, так и на водоразделе.

В меловых скважинах, как и в четвертичных, с 1950 по 2007 г. происходит многолетнее повышение. По-видимому, это повышение связано с увеличением питания безнапорного мелового горизонта за счет увеличения ненасыщенного вертикального нисходящего потока влаги ниже подошвы морены. А увеличение этого потока, в свою очередь связано с ростом уровней грунтовых вод в четвертичном горизонте. Какую-то роль в начале повышения уровней в меловом горизонте в 1950-х годах мог сыграть подпор от создания Докучаевского водохранилища. После 2007 г. замеры в меловых скважинах не производились, поэтому поведение уровней в этот период неизвестно. В настоящее время из всех приведенных на рис. 3, А скважин и шурфов наблюдаются только скважина 1 и Докучаевский колодец.

Для количественного анализа соотношений колебаний уровней подземных вод был использован

корреляционный анализ: рассчитаны коэффициенты корреляции Пирсона для среднемесячных наблюдаемых значений. На рис. 3, Б показана матрица коэффициентов корреляции уровней Докучаевского колодца и остальных скважин. По нему видно, что Докучаевский колодец имеет сильную корреляцию как с четвертичными, так и с меловыми скважинами — значения коэффициента корреляции Пирсона варьируются от 0,76 до 0,99. Худшая корреляционная связь со скважиной 7 по сравнению с другими возможно объясняется тем, что по этой скважине ряд наблюдений самый короткий, а кроме того, в нем есть перерывы. Относительно пониженная корреляция уровней Докучаевского колодца со скважиной 1, по-видимому, связана с тем, что в период 1940–1960-х годов, судя по графику на рис. 3, А в ней практически не был замечен сезонный ход уровней. Этот ход стал соответствовать сезонному ходу в Докучаевском колодце только начиная с 1970-х годов.

В целом, из проведенного анализа синхронных графиков колебаний уровней подземных вод и рассчитанной корреляционной матрицы наблюдений следует, что колебания уровней в Докучаевском колодце соответствуют колебаниям в наблюдательных четвертичных скважинах, а коэффициенты корреляции

ляции для четвертичных скважин имеют значения больше 0,76. Таким образом, можно сделать вывод о том, что уровни, измеренные в Докучаевском колодце, являются репрезентативными по характеру многолетних и внутригодовых колебаний для четвертичного водоносного горизонта распространенного на территории полигона.

*Среднегодовые колебания уровня в колодце и их связь с режимобразующими рядами.* Для дальнейшего анализа в ряду наблюдений Докучаевского колодца были заполнены пропуски среднегодовых значений в 1937–1939 гг., а с 1940 г. проведена его интерполяция на равномерный суточный шаг. Для обеих процедур использовался кусочно-кубический интерполирующий многочлен Эрмита (PCHIP) из библиотеки Python–Pandas [[https://pandas.pydata.org/docs/user\\_guide/index.html#user-guide](https://pandas.pydata.org/docs/user_guide/index.html#user-guide)].

Как отмечалось выше, в момент заложения колодца его глубина была равна 10 м. Однако в текущий период фактическая глубина колодца составляет 8,05 м. В период 2020–2022 гг. оказалось, что по фактическим замерам в 2020 г. уровень был выше дна колодца только весной, в 2021 г. колодец был сухой весь год, а в 2022 г. только несколько летних фактических замеров показали минимальный слой воды над его дном. На момент написания статьи уже известно, что в марте 2023 г. в колодце появилась вода, и ее уровень на конец марта поднялся на 48 см над дном. Для того, чтобы оценить среднегодовую глубину залегания уровня в эти годы была проанализирована связь среднегодовых и максимальных уровней за последние десятилетия. Оказалось, что среднегодовые уровни в среднем ниже на  $\Delta = 0,88$  м, чем максимальные, поэтому для оценки среднегодовых уровней в 2020, 2022 и 2023 гг. из максимальных наблюдаемых уровней вычиталась величина  $\Delta$ . А для 2021 г. эта величина вычиталась из отметки дна колодца.

Восстановленный таким образом ряд среднегодовых уровней за весь период наблюдений приведен на рис. 4. Визуальный анализ этого графика показывает, что наблюдаемый временной ряд не выглядит статистически однородным. На нем можно выделить как минимум четыре периода, характеризующихся различными многолетними колебаниями. Первый период от начала наблюдений до середины 1950-х годов, когда шло статистически стационарное колебание уровней вокруг отметки около 180,3 м. Затем наступил период подъема, длившийся до начала 1980-х годов. Этот период сменился статистической стабилизацией на отметках около 182,7 м. А в 2008 г. начался спад, который прослеживается до настоящего времени.

Дополнительно к графику фактических колебаний уровня на данном рисунке показана нормализованная разностная интегральная кривая уровня, рассчитанная как:

$$H_i(N) = \sum_{i=1}^N X(i); X(i) = \frac{H(i) - H_{\text{cp}}}{\sigma_H}, \quad (1)$$

где  $H_i(N)$  — расчетное значение нормализованной разностной интегральной кривой в год  $N$  от начала наблюдений,  $X(i)$  — нормализованная отметка уровня в  $i$ -й год,  $H_{\text{cp}}$  — среднемноголетнее значение отметки уровня,  $\sigma_H$  — среднеквадратичное отклонение среднегодовых уровней.

Из рис. 4 следует, что эта кривая по своей сути имеет более сглаженный характер, она с некоторым запаздыванием повторяет ход кривой уровня, но в ней второй и третий период не разделяются.

Для того, чтобы оценить масштаб спада, наблюдаемого в последние годы, на рис. 5 показаны квантили — квантили графики среднегодовых отметок уровня и его годовых приращений. Из данного графика хорошо видно, что за весь период наблюдений из пяти лет с наиболее низкими значениями уровня три года приходятся на 2020–2022, а в пять лет с максимальным годовым отрицательным приращением (падением) уровня попали три года начиная с 2008 г., причем два из них — 2008 и 2009 — шли подряд. При этом величина падения уровня за 15 лет, от четвертой во всем наблюдаемом ряду максимальной отметки года в 2006 до низшей отметки 2021 составила более четырех стандартных отклонений, рассчитанных по полному 129-летнему ряду наблюдений, то есть максимальные изменения в ряду среднегодовых отметок уровня произошли на последнем участке, длина которого составляет около 11% от общей длины ряда.

Режим подземных вод четвертичного горизонта, не имеющий прямой гидравлической связи с нижележащим меловым горизонтом, определяется внутригодовой и многолетней динамикой инфильтрационного водообмена в системе подземные воды — ландшафт. Этот водообмен связан с трансформацией осадков на поверхности и в почве [Гриневский, Поздняков, 2010], на уровне многолетней изменчивости показателями его динамики могут служить многолетние ряды осадков и потенциальной эвапотранспирации (испаряемости). Для оценки динамики этих показателей из базы метеорологической данных [<http://meteo.ru/data/162-temperature-precipitation#описание-массива-данных>] о суточной динамике осадков, температур и скорости ветра для метеостанции Каменная степь рассчитаны ряды годовых сумм осадков и потенциальной эвапотранспирации. Годовая потенциальная эвапотранспирация оценивалась по модели Шаттлворта-Воланса [Shuttleworth, Wallace, 1985] на суточном уровне разрешения. Для этой модели в программе SURFBAL [Гриневский, Поздняков, 2010] требуется внутригодовая и многолетняя динамика индекса развития листьев  $LAI$  и высота растительности  $h_p$ . Особенностью участка расположения колодца является то, что одновременно с ним вокруг него была заложена дубовая лесополоса, поэтому первые десятилетия происходил интенсивный рост высоты деревьев и рост связанного с ней индекса развития листьев. Рост деревьев  $h_p(t)$  учтен с использованием данных

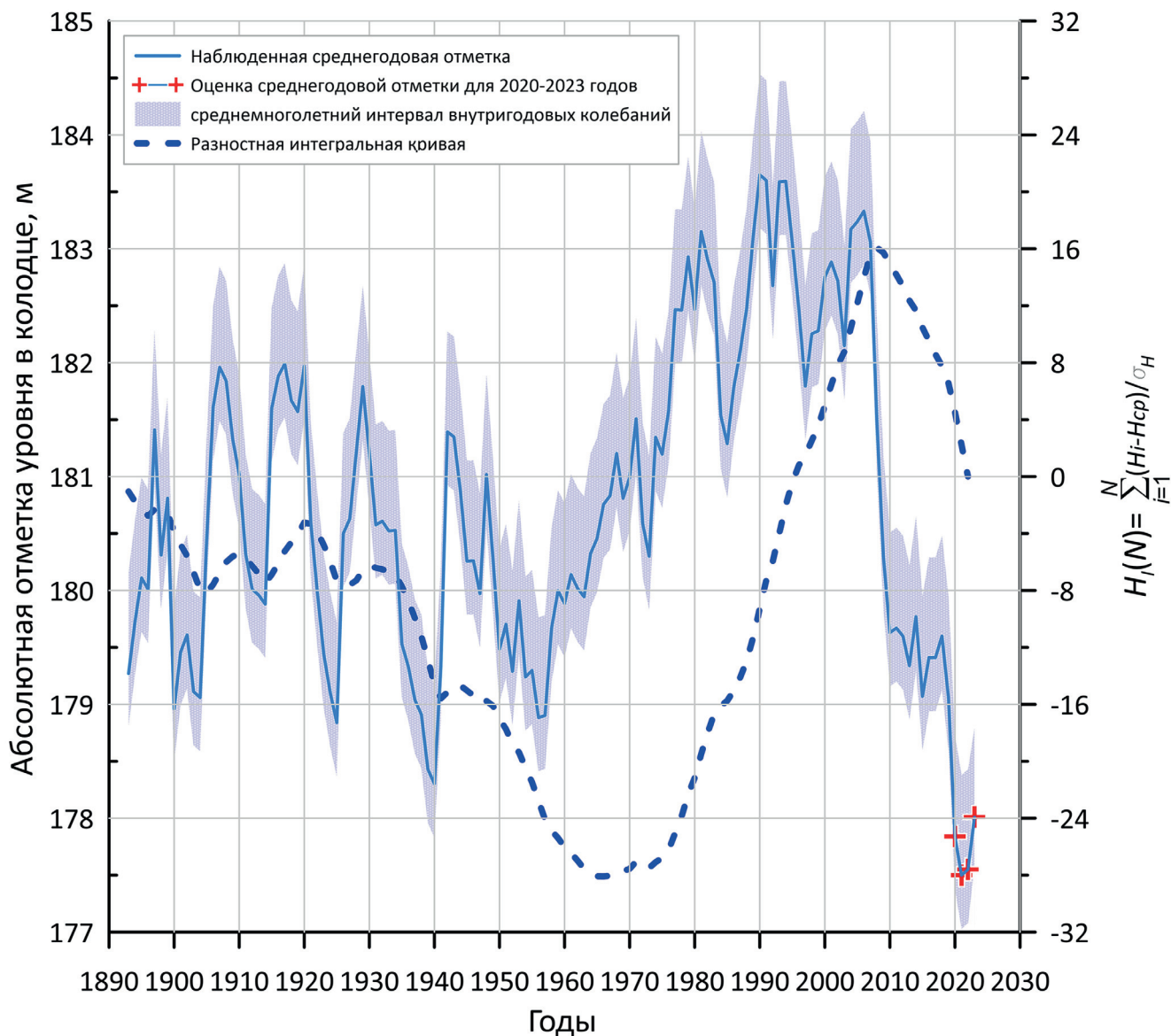


Рис. 4. Динамика среднегодовой отметки уровня воды в Докучаевском колодце. Отметка поверхности земли у колодца 186,46 м, фактическая отметка дна колодца 178,41 м

таксации лесополос Каменной степи [Чевердин и др., 2018] в виде эмпирической зависимости:

$$h_p(t) = h_{\max} [1 - \exp(-(t/t_0)^\lambda)], \tag{2}$$

где эмпирические параметры  $h_{\max}=30$  м,  $t_0=51,7$  год,  $\lambda=1,2$ .

Связь максимального в период вегетации индекса развития листьев  $LAI_{\max}$  с высотой деревьев в свою очередь описывалось зависимостью [Yuan et al., 2013]:

$$LAI_{\max} = 0,742 h_p^{0,746}, \tag{3}$$

Данные о температурах и осадках по метеостанции Каменная Степь доступны с 1904 г., но фактические записи о среднесуточной скорости ветра существуют только с 1966 г., поэтому до этого года при расчетах потенциальной эвапотранспирации

использовались среднемноголетние наблюдаемый значения скорости ветра для текущего дня за период 1966–2022 гг. Учет роста и смыкания кров деревьев при помощи зависимостей (2–3) привел к тому, что с начала XX в. до 2020-х годов расчетная величина потенциальной эвапотранспирации достаточно закономерно падала от 895 мм до стабилизации и колебаний вокруг 700 мм с 1930-х годов за счет того, что потенциальное физическое испарение в этот период уменьшалось в связи с ростом затененности почвы растущими деревьями и повышения аэродинамического сопротивления турбулентному обмену в приземном слое воздуха.

На рис. 6 показаны синхронные нормализованные интегральные кривые для уровней воды в колодце, годовых сумм осадков, годовых сумм потенциальной эвапотранспирации и годовых сумм избытка влаги. Годовая сумма избытка влаги рассчитывалась как разница между осадками и потенциальной эва-

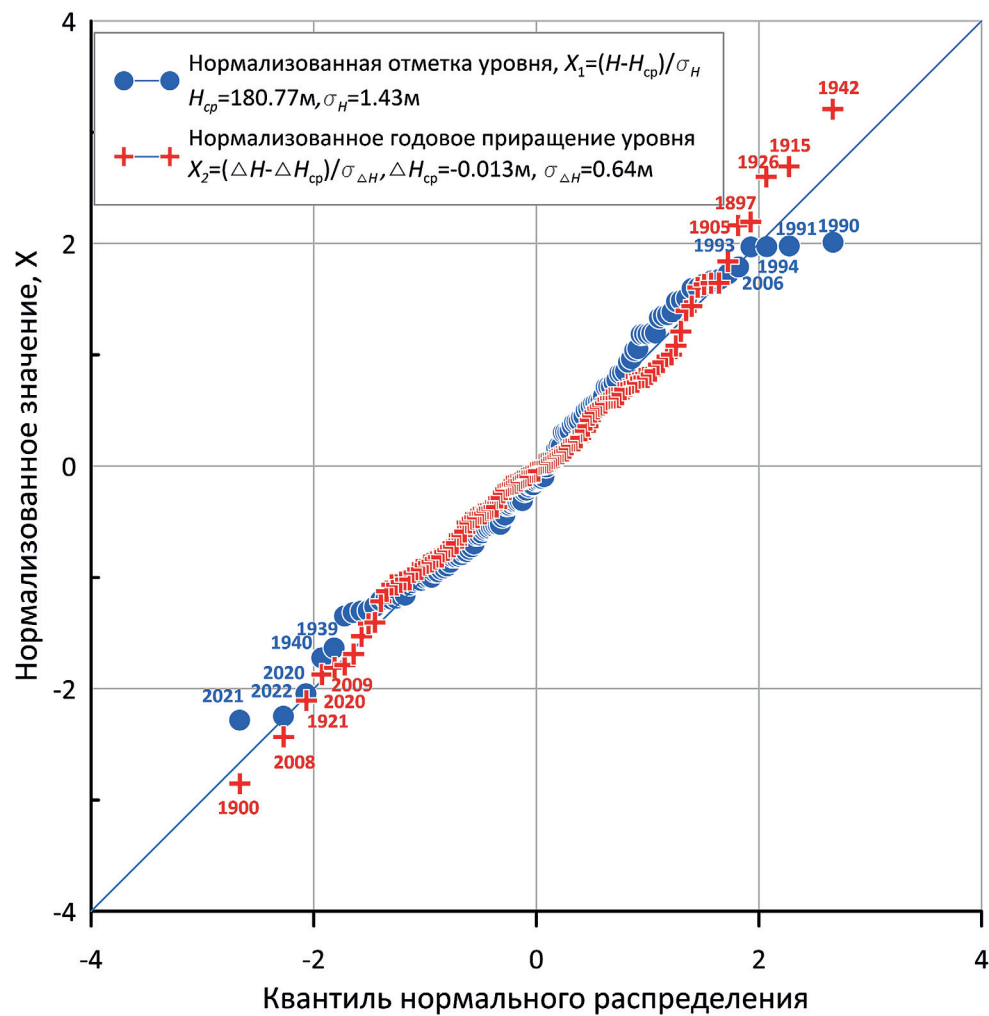


Рис. 5. Квантиль–квантиль график абсолютных отметок уровня Докучаевского колодца и его приращений. Цифры у символов — год, в который наблюдалась данная величина уровня или его приращений

потранспирацией. Нормализованные интегральные кривые рассчитывались для каждого показателя на рис. 6 по зависимости (1). Статистические характеристики исходных анализируемых рядов приведены в табл. 1, из которой следует, что при анализе результатов за период наблюдений длительностью

сто и более лет статистически значимый линейный тренд выявляется для уровней воды в колодце, для осадков и для потенциальной эвапотранспирации. Однако, доля общей изменчивости, объясняемая этими трендами весьма невелика — коэффициент детерминации  $r^2$  для осадков и потенциальной

Таблица 1

Статистические характеристики анализируемых рядов за 1904–2021 гг.

| Переменная<br><br>Показатель                                                                                                                                                | Отметка<br>воды в ко-<br>лодце $H$ , м | Годовая сумма, мм                           |                                |                              |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|---------------------------------------------|--------------------------------|------------------------------|
|                                                                                                                                                                             |                                        | Потенциальная эва-<br>потранспирация, $PET$ | Осадки, $P$                    | Избыток<br>влаги             |
| Минимум                                                                                                                                                                     | 177,5                                  | 554                                         | 268                            | –517                         |
| Максимум                                                                                                                                                                    | 183,65                                 | 895                                         | 826                            | 140                          |
| Среднее                                                                                                                                                                     | 180,88                                 | 710                                         | 466                            | –244                         |
| Стандартное отклонение                                                                                                                                                      | 1,43                                   | 67                                          | 100                            | 134                          |
| Коэффициент вариации                                                                                                                                                        | 0,0079                                 | 0,094                                       | 0,215                          | –0,552                       |
| Коэффициент асимметрии                                                                                                                                                      | 0,106                                  | 0,592                                       | 0,436                          | 0,083                        |
| Коэффициент автокорреляции смежных лет                                                                                                                                      | 0,928                                  | 0,17                                        | 0,25*                          | 0,16*                        |
| Первая строка в ячейке — угловой коэффициент<br>линейного тренда и его стандартная ошибка, мм<br>в год, вторая — коэффициент детерминации $r^2$ ,<br>третья — $p$ -значение | 8,7+/-3,8<br>0,04<br>0,03              | 0,54*+/-0,17<br>0,10<br>0,002               | 0,95 +/-0,25<br>0,10<br>0,0007 | 0,59*+/-0,41<br>0,02<br>0,15 |

Примечание: \* — рассчитано для периода 1922–2021 гг.

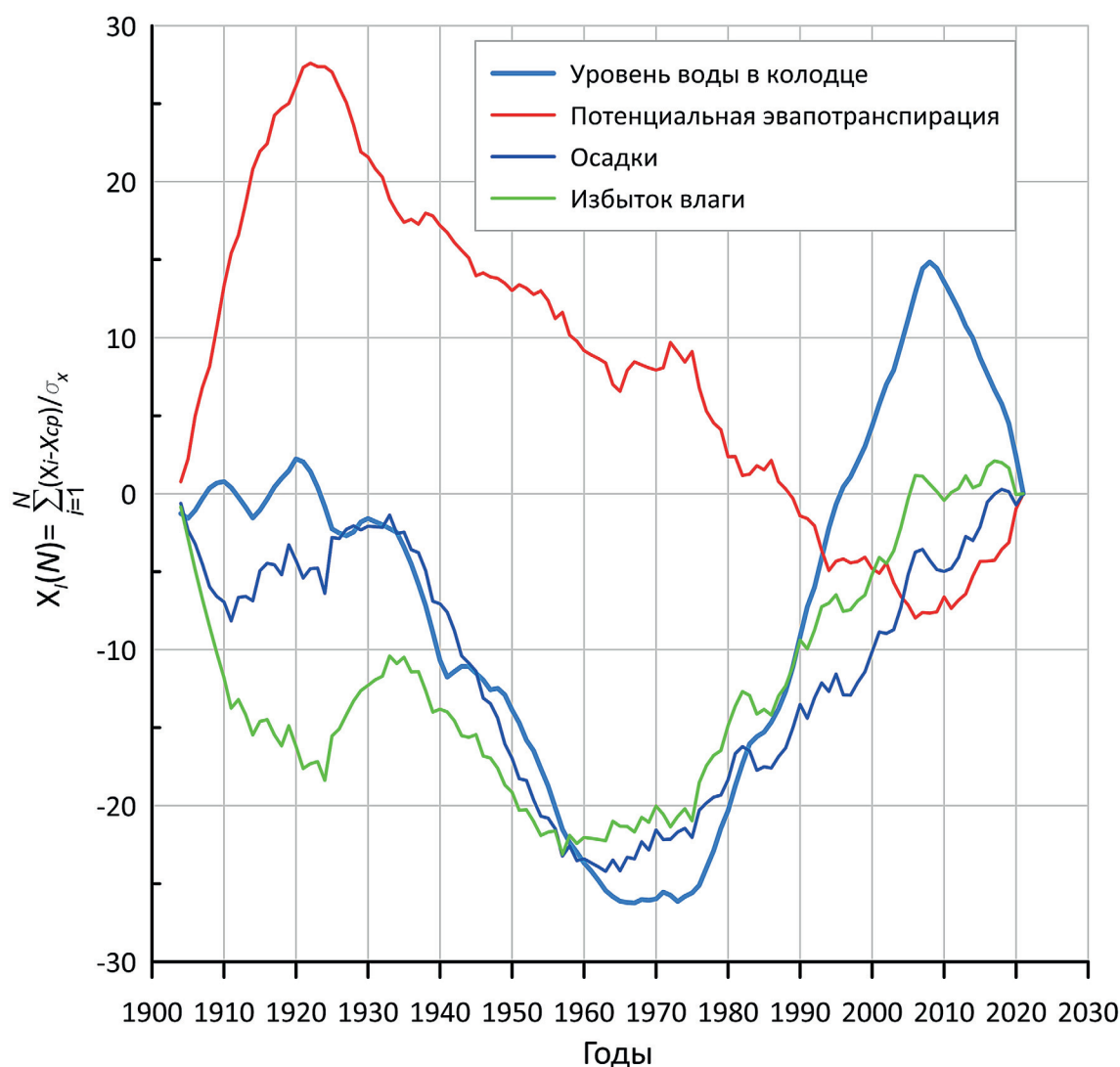


Рис. 6. Синхронные нормализованные разностные интегральные кривые рядов уровней воды в колодце, расчетной потенциальной эвапотранспирации, осадков и расчетного избытка влаги за 1904-2021 гг.

эвапотранспирации составляет 0,1, а для уровней всего 0,04.

Из рис. 6 видно, что действительно уровень воды в колодце формируется за счет инфильтрационного водообмена, так как его интегральная разностная кривая по крайней мере до начала XXI в. повторяет такую же кривую для осадков и расчетного избытка влаги, следуя за последней с некоторым опозданием. Поэтому выделенные выше первые три характерных участка колебаний уровня воды в колодце связаны с многолетней динамикой избытка влаги, которая согласно табл. 1 имеет достаточно высокую вариабельность, минимум в конце 1950-х годов и рост во второй половине XX в. В XXI в. интегральная разностная кривая уровня ведет себя отлично от такой же кривой избытка влаги, но при этом она зеркально отражает кривую для потенциальной эвапотранспирации: переход последней из фазы падения в фазу роста сопровождается с некоторым запаздыванием переходом роста разностной интегральной кривой уровней воды в колодце в фазу ее падения. Раз-

ностная интегральная кривая для потенциальной эвапотранспирации на рис. 6 имеет выраженный пик в начале 1920-х годов, связанный с описанной выше перестройкой потенциального испарения за счет роста и смыкания крон деревьев.

Для более подробного анализа связи колебаний уровня в XXI в. с характеристиками инфильтрационного водообмена на рис. 7 приведены синхронные графики колебаний уровней воды в колодце и расчетного избытка влаги. При этом расчетный избыток влаги определялся двумя способами. В первом способе использовалась разница между осадками и потенциальной эвапотранспирацией по Шаттлворту-Волансу, во втором способе вместо потенциальной эвапотранспирации использовалось суммарное испарение из данных реанализа MODIS [Mu et al., 2011] для ближайшего к колодцу узла 500-метровой сетки спутниковой съемки.

Нормализованные значения на рис. 7, А рассчитывались с использованием среднего и стандартного отклонения не за весь период наблюдений, а толь-

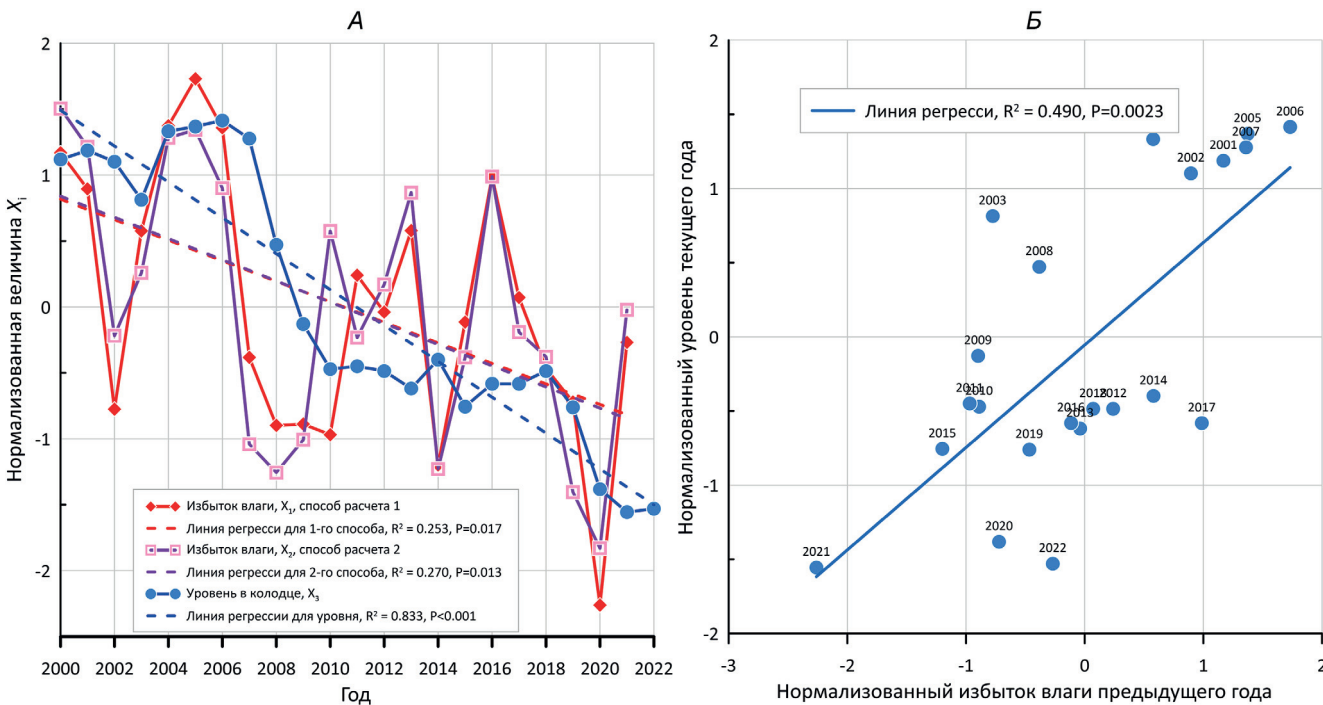


Рис. 7. А — синхронные ряды нормализованного избытка влаги и уровня воды в колодце за 2000–2022 гг.; Б — корреляция уровня текущего года и избытка влаги, рассчитанного по 1-му способу

ко за исследуемый период 2000–2022 гг. В целом в первые 20 лет XXI в. на исследуемой территории наблюдается заметный тренд, связанный со снижением расчетного избытка влаги на фоне его колебаний от года к году. Это подтверждается и тем, что на региональном уровне всего бассейна Дона в 2007–2015 гг. отмечался существенный маловодный период [Киреева и др., 2017]. Согласно рис. 7, А кривая снижения уровней наследует колебания расчетного избытка влаги с некоторым запозданием. Согласно рис. 7, Б корреляция между среднегодовым уровнем текущего года в XXI в. и профицитом влаги предыдущего года достаточно высока, что может свидетельствовать о том, что наблюдаемое небывалое падение уровня в колодце в последние 15 лет, по-видимому, результат многолетнего хода в XXI в. основных режимобразующих факторов — осадков и испарения связанные с динамикой этих факторов. При этом влияние режимобразующих факторов может проявляться не только через инфильтрационный водообмен. Как отмечалось в [Корабельников и др., 2009], четвертичный водоносный горизонт — основной источник децентрализованного водопользования местного населения. Уменьшение избытка, то есть рост дефицита влаги последние 15 лет могло вызвать повышение децентрализованного водоотбора для поливов, что увеличило расходные статьи баланса этого верхового горизонта.

Для краткосрочного прогнозирования с периодом упреждения 1 год среднегодовых уровней с учетом инерционности временного ряда и изменчивости режимобразующих факторов, в табл. 2 приведена рассчитанная для всего периода наблюде-

Таблица 2

Кросс-корреляционная матрица среднегодовых уровней текущего года с уровнями, осадками и потенциальной эвапотранспирацией предыдущего года, рассчитанные для ряда наблюдений за 1904–2021 годы\*

|                                                           | $H_{i-1}$ | Осад-<br>ки, $P_{i-1}$ | Потенциальная эвапо-<br>транспирация, $PET_{i-1}$ | $H_i$ |
|-----------------------------------------------------------|-----------|------------------------|---------------------------------------------------|-------|
| $H_{i-1}$                                                 | 1         |                        |                                                   |       |
| Осадки, $P_{i-1}$                                         | 0,409     | 1                      |                                                   |       |
| Потенциаль-<br>ная эвапо-<br>транспирация,<br>$PET_{i-1}$ | -0,343    | -0,195                 | 1                                                 |       |
| $H_i$                                                     | 0,928     | 0,491                  | -0,425                                            | 1     |

Примечание: \* — при расчете корреляции уровней и осадков, чтобы учесть переходящий снеготазпас для последних, границы года выбирались с 1-го декабря года  $i - 2$  до 30 ноября года  $i - 1$ .

ний корреляционная матрица уровня воды смежных лет с осадками и потенциальной эвапотранспирацией. Поскольку согласно этой таблице величины среднегодового уровня в колодце для смежных лет имеют весьма высокую корреляцию между собой, ( $r = 0,928$ ), а среднегодовой уровень текущего года коррелирован и с суммой осадкой предыдущего года ( $r = 0,491$ ) и потенциальной эвапотранспирацией предыдущего года ( $r = -0,425$ ), то для прогнозирования уровня на год вперед целесообразно использовать простую регрессионную модель, описываемую уравнением:

$$H_i = B_0 + B_1 H_{i-1} + B_2 P_{i-1} + B_3 PET_{i-1}, \quad (4)$$

где  $H$  — абсолютная отметка уровня в колодце, м,  $P$  — годовая сумма осадков, мм,  $PET$  — годовая потенциальная эвапотранспирация по Шаттлворту-Волансу, мм, индексы  $i$ ,  $i-1$  означают текущий и предыдущий годы.

В табл. 3 приведены параметры уравнения (4), оцененные при помощи модели многомерной линейной регрессии. Эта модель для всего массива наблюдений имеет коэффициент корреляции между наблюдаемым и оцененным значением 0,942 и стандартную ошибку прогноза 0,53 м. Нормализованные регрессионные коэффициенты ( $\beta_1$ – $\beta_3$ ) регрессионного уравнения (4) можно интерпретировать как коэффициенты чувствительности прогнозного уровня в колодце к совместному влиянию предыстории его эволюции, которая отражена в достигнутом в  $i-1$  году положении уровня и текущих факторов, определяющих поступления и расходования влаги и влияющих таким образом на текущий инфильтрационный водообмен. Из табл. 3 следует, что вклад предыстории процесса в ожидаемый уровень  $i$ -го года существенно выше, чем вклад факторов, формирующих текущий инфильтрационный водообмен.

Таблица 3

Параметры модели линейной регрессии для оценки среднегодового уровня в колодце последующего года при известном уровне, осадках и потенциальной эвапотранспирации текущего года

| Регрессионный коэффициент | Значение | Стандартная ошибка | Нормализованное значение регрессионного коэффициента $\beta_k$ |
|---------------------------|----------|--------------------|----------------------------------------------------------------|
| $B_0$                     | 26,9513  | 7,705              | –                                                              |
| $B_1$                     | 0,8381   | 0,0417             | 0,8381                                                         |
| $B_2$                     | 0,00211  | 0,00064            | 0,1267                                                         |
| $B_3$                     | –0,0037  | 0,0011             | –0,1119                                                        |

**Многолетняя динамика внутригодовых колебаний.** Внутригодовая изменчивость уровней воды в колодце связана с изменчивостью инфильтрационного питания. Временные колебания питания должны отражать динамику условий поступления влаги на поверхность земли и ее расходования из корнеобитаемого слоя. В Каменной Степи формируется устойчивый зимний снеговой покров, поэтому основное поступление влаги в зону аэрации происходит в период весеннего снеготаяния. На рис. 8, А показана внутригодовая и многолетняя изменчивость среднесуточных температур приповерхностного воздуха в Каменной Степи. Из этого рисунка видно, как региональный отклик на глобальное потепление проявляется в ходе температур в исследуемом регионе. С конца 1960-х годов происходит смещение нулевой изолинии со среднего значения 90 суток от начала года до 70–80 и даже 60 суток для отдельных лет в начале XXI в. В целом в холодный период года увеличивается число оттепелей — дней с положительной температурой (рис. 8, Б). Кроме того, увеличивается продолжительность вегета-

онного периода, условно ограниченного изолинией 5 градусов от 200 суток в начале-середине XX в. до приблизительно 220 суток в начале XXI в. Эти процессы могли найти отражение в закономерностях внутригодовых колебаний грунтовых вод.

Для оценки закономерностей внутригодовых колебаний уровня в колодце использовался проинтерполированный на суточное разрешение фрагмент ряда наблюдений с 1940 г. Этот ряд с помощью библиотеки *Python Statsmodels* [https://www.statsmodels.org/dev/generated/statsmodels.tsa.seasonal.seasonal\_decompose.html] был разложен на многолетнюю тенденцию, полученную методом скользящего среднего и отклонения от нее в виде сезонной составляющей с периодом один год и случайной составляющей.

На рис. 9, А показаны внутригодовая динамика суммы сезонной и случайной составляющих полученного разложения, отражающие внутригодовой ход уровня. На рис. 9, Б показана внутригодовая динамика основных режимобразующих характеристик, формирующих инфильтрационный водообмен. Эти характеристики связаны с поступлением и расходованием влаги в почве и рассчитаны при помощи модели трансформации осадков на поверхности земли SURFBAL [Гриневский, Поздняков, 2010], они включают впитывание влаги с поверхности в периоды выпадения жидких осадков и снеготаяния, транспирационную и испарительную составляющие суммарной потенциальной эвапотранспирации модели Шаттлворта-Воланса. Графики на рис. 9 иллюстрируют особенности среднемноголетнего внутригодового инфильтрационного водообмена в Каменной Степи. Осадки за холодный период года с осени до весны формируют за счет осенних дождей, зимних оттепелей и весеннего снеготаяния впитывание влаги в почву и ее нисходящее движение. Это движение коррелируется с подъемом внутригодового гидрографа уровней грунтовых вод с разными скоростями. Наибольшая скорость подъема начинается с марта-апреля и это реакция на весеннее снеготаяние в феврале-первой декаде апреля. Летний спад уровней грунтовых вод связан с тем, что в теплый период года две составляющие суммарной эвапотранспирации существенно превышают выпадающие в это время осадки. Происходит иссушение почвенного слоя, вызывающее вертикальную миграцию влаги снизу вверх, в том числе и с уровня грунтовых вод. При этом, по-видимому, главную роль в снижении уровня грунтовых вод играет транспирация [Чевердин и др., 2018]. Значительная роль транспирации видимо связана с тем, что корневая система взрослых деревьев может проникать на достаточно большие глубины, что облегчает подъем влаги к корням от уровня грунтовых вод. Так, исследование вертикального распределения корней дуба в северной части Германии [Thomas, 2000] показало, что в суглинистые почвообразующие породы на глубину метр от поверхности земли

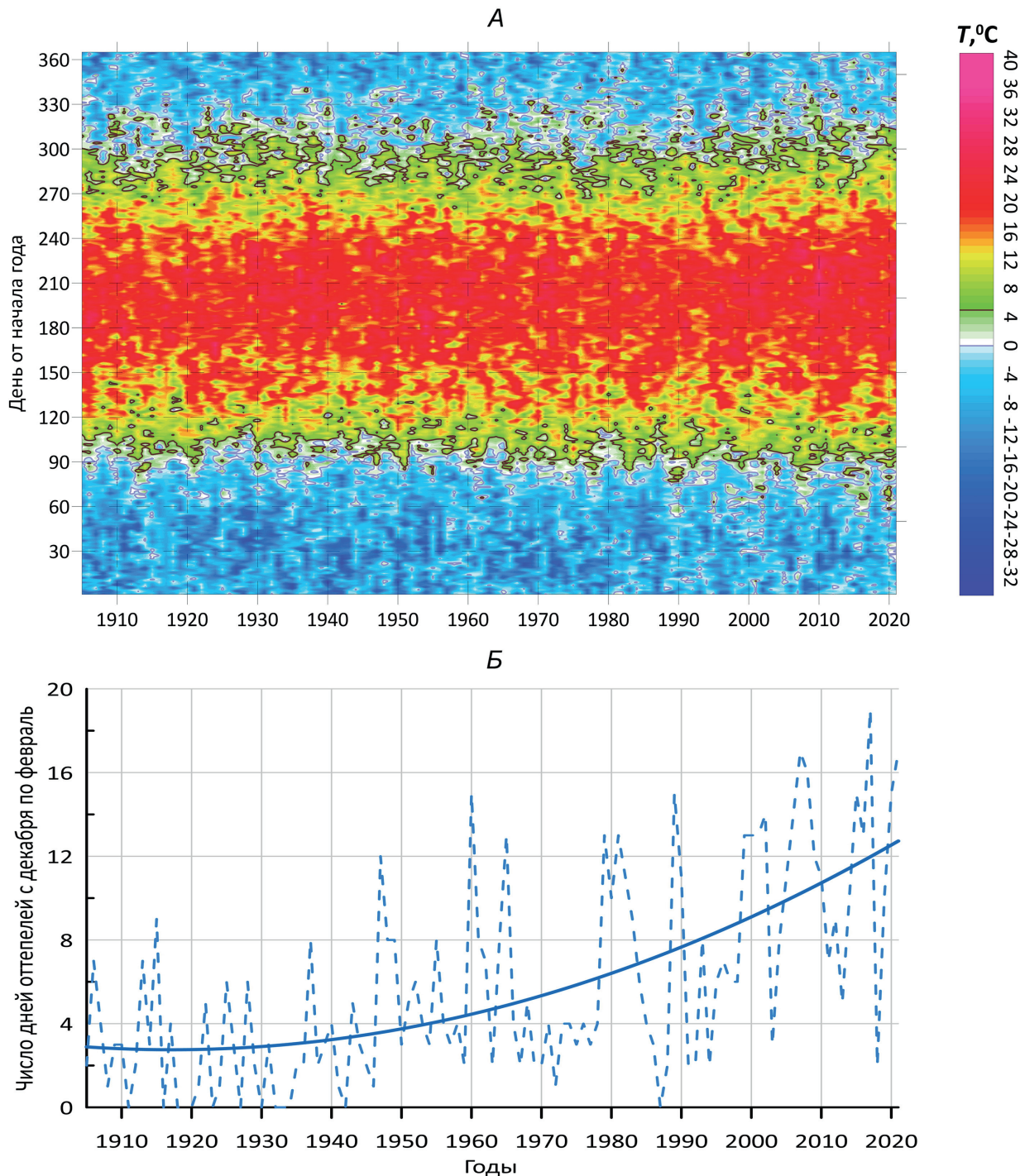


Рис. 8. А — внутригодовая и многолетняя динамика среднесуточных температур по метеостанции Каменная Степь; Б — число дней со среднесуточной температурой более  $10^\circ\text{C}$  в декабре-феврале

проникает около 25% корней дуба, а на глубину 2 м около 5%.

Из рис. 9, А следует, что гидрографы, осредненные за период 1941–1965 гг., когда еще не было заметных температурных изменений, и 1975–2018 гг., несколько отличаются. Весенний подъем до середины 1960-х годов начинался немного позже, и в среднем на полторы декады позже достигался максимальный пик его подъема. Согласно рис. 8 переход температур приземного воздуха через ноль происходит в 90–60-е сутки от начала года, то есть именно в этот период

формируется влагозарядка почвенного слоя за счет впитывания тающего снега (рис 10, Б). Однако пик реакции уровня на это весеннее впитывание достигается на 130–160 сутки от начала года. Это запаздывание связано со скоростью нисходящего движения пакета весенней впитавшейся влаги через зону аэрации до уровня грунтовых вод. Для оценки этой скорости на рис. 10 показана корреляция между минимальной глубиной залегания уровня воды в колодце и днем достижения этой глубины для каждого года наблюдений.

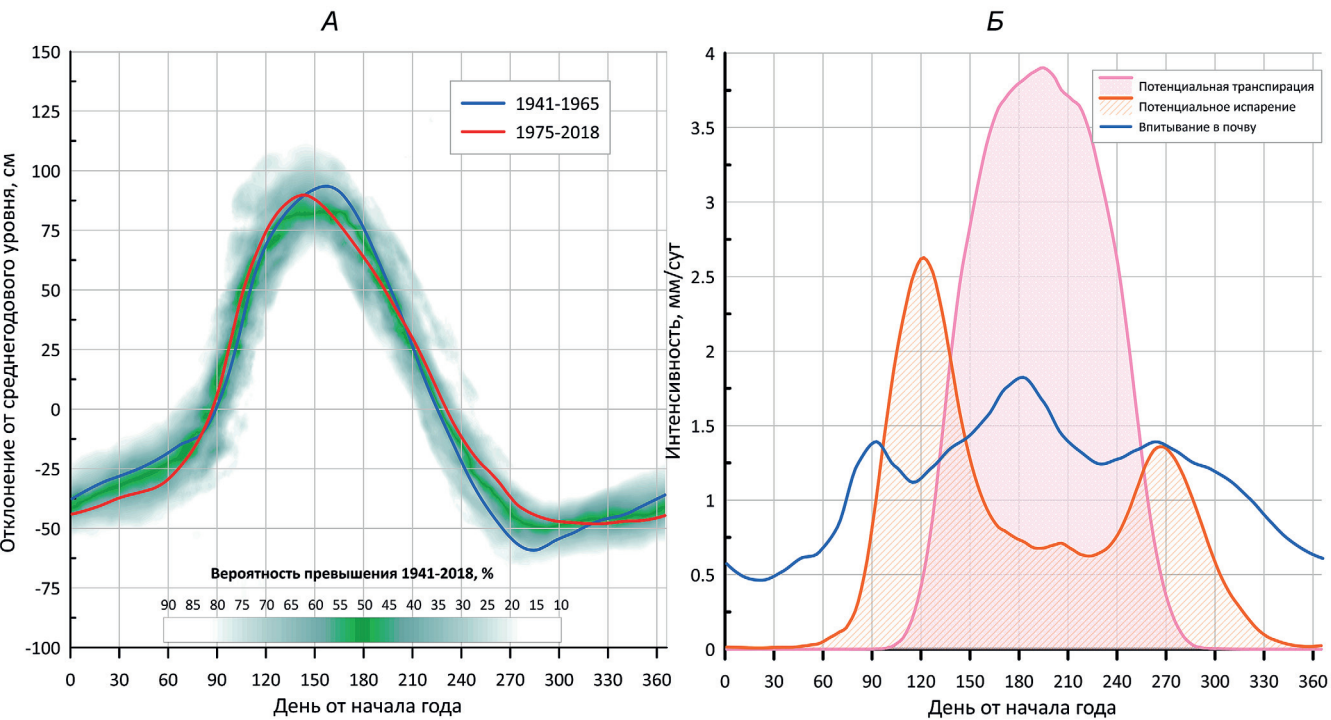


Рис. 9. А — внутригодовой гидрограф уровня воды в Докучаевском колодце, цветом показана вероятностная область флуктуации уровня относительно среднегодового значения, линиями — осредненные гидрографы для двух многолетних периодов; Б — внутригодовой ход осредненных режимобразующих характеристик за 1904–2021 гг. рассчитанные по модели SURFBAL

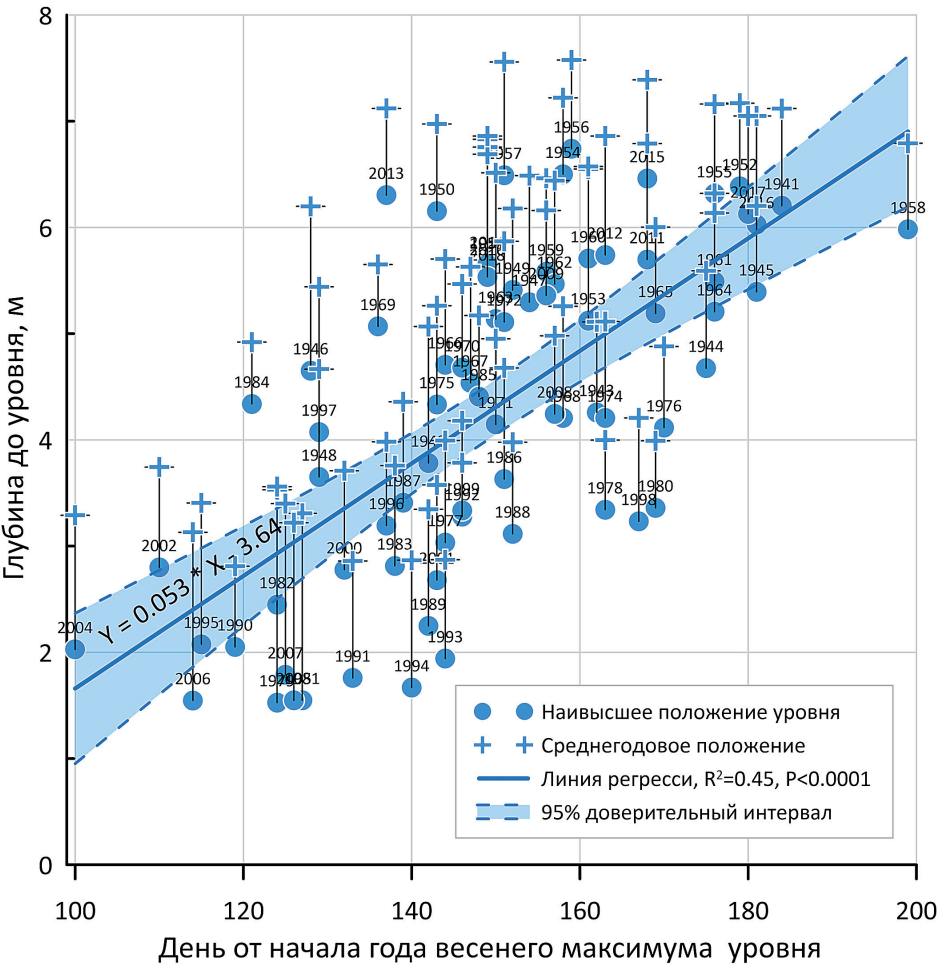


Рис. 10. Связь между минимальной в году глубиной уровня в колодце и днем ее наступления в период 1941–2018 гг.

Очевидно, что средняя скорость нисходящего движения весеннего пакета влаги определяется уклоном линейного уравнения регрессии минимальной глубины от времени, и согласно рис. 10 эта скорость составляет примерно 0,05 м/сут. Из рис. 9, А, используя метод А.В. Лебедева [Шестаков, 1995], можно оценить, сколько же в среднем влаги поступает на уровень грунтовых вод за счет весеннего питания (рис. 9, А). Подъем уровня с марта по июнь составлял в период 1975–2018 гг. примерно 63 см, при характерных значениях коэффициента недостатка насыщения водовмещающих отложений 0,05–0,07 этот подъем соответствует слою питания в 31–44 мм. Среднегодовая величина осадков за этот период составила около 515 мм, то есть питание грунтовых вод составляет 6,5–8,5% от годовой суммы осадков.

**Заключение.** Докучаевский колодец является уникальным пунктом мониторинга грунтовых вод с наиболее длинным периодом наблюдений в России и Европе. Особенность формирования подземных вод четвертичного верхового горизонта, на который оборудован колодец, состоит в том, что внутригодовая и многолетняя динамика уровней грунтовых вод определяется динамикой инфильтрационного водообмена между поверхностью и подземными водами. Это означает, что заметные изменения водного баланса на поверхности земли и в почве должны отражаться в гидрографе уровней колодца. Иными словами — данные мониторинга уровней Докучаевского колодца содержат в себе скрытую информацию о протекающих в Каменной Степи климатических изменениях локального и вероятно глобального масштаба.

Проведенные исследования наблюдаемых и расчетных временных рядов позволяют с высокой степенью определенности утверждать, что наблюдаемая динамика уровня воды в колодце наследует в многолетнем разрезе ход основных режимобразующих факторов — осадков и потенциальной эвапотранспирации, определяющих избыток или дефицит влаги для формирования инфильтрационного питания. С динамикой именно этих факторов связано и отмечаемое в последние 15 лет экстремальное снижение уровней воды в колодце вплоть до его частичного осушения в 2020–2022 гг. Однако остается неясным,

является ли это осушение результатом только экстремально низкой серии величин среднегодового инфильтрационного питания последних лет, или этот процесс ускоряется увеличением местного водоотбора для полива огородов в летние засушливые периоды. Для более определенного ответа на этот вопрос требуется разработка геогидрологической модели исследуемого участка.

Метеоданные по станции Каменная Степь показывают существенное влияние потепления на ход наблюдаемых температур воздуха с 1960–1970 гг., развившееся в более раннем наступлении весеннего снеготаяния, увеличении числа зимних оттепелей и удлинении вегетационного периода. Эти процессы отражаются в формировании внутригодового гидрографа уровней воды в колодце — в первую очередь в сдвиге летне-весеннего максимума уровней в конце XX и начале XXI в. на полторы декады к началу года по сравнению с серединой XX в. Однако, в целом трансформация внутригодового гидрографа колодца в XXI в. по сравнению с серединой XX в. не так существенна, как, например, трансформация гидрографов рек в бассейне Дона [Киреева, Фролова, 2013]. По-видимому, это во многом связано с вариациями от года к году зимне-весеннего впитывания, формирующего основное годовое инфильтрационное питание в Каменной степи. Кроме того, на динамику внутригодового инфильтрационного водообмена подземных вод с поверхностью влияют вариации год от года летнего потребления влагозапасов почвенных вод растительностью, вызывающие иссушение корнеобитаемого слоя и, как следствие, восходящий влаги с уровня грунтовых вод. Интенсивность и продолжительность этого подтока в свою очередь зависит от текущего положения уровня грунтовых вод и влажности зоны аэрации сформировавшейся весной. Вся перечисленная изменчивость внутригодового инфильтрационного водообмена существенно влияет на внутригодовую динамику уровней грунтовых вод и скрывает направленный климатический сигнал в реакции грунтовых вод, поэтому она проявляется не так заметно, как реакция гидрографов рек.

**Финансирование.** Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 21-47-00008.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барабанов А.Т., Панов В.И. Преобразование гидрологического режима агроландшафтов защитными лесными насаждениями // Живые и биокосные системы. 2016. № 16. URL: <http://www.jbks.ru/archive/issue-16/article-6>
2. Булыгина О.Н., Разуваев В.Н., Александрова Т.М. Описание массива данных суточной температуры воздуха и количества осадков на метеорологических станциях России и бывшего СССР (ТТТТ) Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2014620942. URL: <http://meteo.ru/data/162-temperature-precipitation#описание-массива-данных>
3. Воронежский государственный природный биосферный заповедник имени В.М. Пескова. [Электронный ресурс]. URL: <https://zapovednik-vrn.ru/> [дата обращения: 10.10.2021]
4. Гриневский С.О., Поздняков С.П. Принципы региональной оценки инфильтрационного питания подземных вод на основе геогидрологических моделей // Водные ресурсы. 2010. Т. 37, № 5. С. 543–557.
5. Зборищук Ю.Н., Турусов В.И. Микроэлементы в почвах каменной степи: Монография. Воронеж: Истоки, 2019. 94 с.

6. Киреева М.Б., Илич В.П., Фролова Н.Л. и др. Вклад климатических и антропогенных факторов в формирование маловодного периода в бассейне р. Дон 2007–2015 гг. // Геориск. 2017. № 4. С. 10–21.
7. Киреева М.Б., Фролова Н.Л. Современные особенности весеннего половодья рек бассейна Дона // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2013. № 1. С. 60–76.
8. Корабельников Н.А., Устименко Ю.А., Зинюков Ю.М. и др. Комплексная оценка гидрогеологических, инженерно-геологических и эколого-геологических условий как основа оптимизации мониторинга геологической среды территории федерального полигона «Каменная степь». Вып. 57. Воронеж: Изд-во Научно-исследовательского института геологии, 2009.
9. Рыбальский Н., Муравьёва Е. 25 лет заказнику «Каменная Степь» («Докучаевскому оазису») // Природа России. Национальный портал. 2021. URL: <http://www.priroda.ru/reviews/detail.php?ID=12949> (дата обращения: 25.10.2021)
10. Трезуб А.И. Неотектоника территории Воронежского кристаллического массива // Тр. науч.-исслед. ин-та геологии Воронеж. гос. ун-та. 2002. Вып. 9. 220 с.
11. Турусов В.И., Титова Т.В., Чевердин Ю.И. и др. Каменная степь — колыбель разноплановых исследований (прошлое, настоящее и будущее) (обзор) // Итоги и перспективы развития агропромышленного комплекса: Мат-лы Междунар. науч.-прак. конф. / Сост. Н.А. Щербакова, А.П. Селиверстова. Солёное Займище: ФГБНУ «ПНИИАЗ», 2018. С. 254–259.
12. Харченко Н.Н., Харченко Н.А., Ахтырцев А.Б. Мелиоративная роль дубрав Центральной лесостепи // Лесотехн. журн. 2014. Т. 4, № 1(13). С. 40–47.
13. Хитров Н.Б., Чевердин Ю.И. Почвы Каменной Степи от времени В.В. Докучаева до наших дней // Живые и биокосные системы. 2016. № 16. URL: <http://www.jbks.ru/archive/issue-16/article-2>
14. Чевердин Ю.И., Ахтямов А.Г., Сауткина М.Ю. Влияние режима уровня грунтовых вод на биопродуктивность древесных пород в лесных полосах Каменной Степи // Живые и биокосные системы. 2018. № 24.
15. Шестаков В.М. Гидрогеодинамика. М.: Изд-во МГУ, 1995, 368 с.
16. Mu Q.Z., Zhao M., Running S.W. Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm // Remote Sensing of Environment. 2011. Vol. 115, Issue 8. P. 1781–1800.
17. Pandas Documentation [Электронный ресурс]. URL: [https://pandas.pydata.org/docs/user\\_guide/index.html#user-guide](https://pandas.pydata.org/docs/user_guide/index.html#user-guide)
18. Python Statsmodel [Электронный ресурс]. URL: [https://www.statsmodels.org/dev/generated/statsmodels.tsa.seasonal.seasonal\\_decompose.html](https://www.statsmodels.org/dev/generated/statsmodels.tsa.seasonal.seasonal_decompose.html)
19. Shuttleworth W.J., Wallace J.S. Evaporation from sparse crops—an energy combination theory // Quarterly J. Royal Meteor. Soc. 1985. № 111(469). 839–855.
20. Thomas F.M. Vertical rooting patterns of mature Quercus trees growing on different soil types in northern Germany // Plant Ecology. 2000. № 147. P. 95–103.
21. Yuan Y. et al. Examination of the Quantitative Relationship between Vegetation Canopy Height and LAI // Adv. Meteorol. 2013. P. 1–6.

Статья поступила в редакцию 29.05.2023,  
одобрена после рецензирования 05.06.2023,  
принята к публикации 16.08.2023