

УДК 551.24.01 + 556.3.01

РОЛЬ ПРИСДВИГОВЫХ СТРУКТУР РАСТЯЖЕНИЯ В СУБВЕРТИКАЛЬНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ ВОДОНАПОРНОЙ СИСТЕМЫ МОСКОВСКОГО АРТЕЗИАНСКОГО БАСЕЙНА

Светлана Алексеевна Глухова^{1✉}, Олег Викторович Пинигин²,
Александр Владилинвич Расторгуев³

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; koval.sa95@yandex.ru

² Индивидуальный предприниматель, Москва, Россия, 7178973@mail.ru

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; alvr9@mail.ru

Аннотация. Представлены результаты исследования, в рамках которого в западной части Московской области выявлена локальная куполообразная пьезометрическая поверхность подольско-мячковского водоносного комплекса, центральная часть которой совпадает с вытянутой заболоченной впадиной. Результаты морфоструктурного и геолого-структурного анализов показывают, что впадина может иметь тектоническое происхождение. При помощи метода математического моделирования показано, что формирование купола питания подземных вод возможно только за счет наличия зоны повышенной проницаемости келловей-кимериджского водоупорного комплекса, сформированной при развитии разрывных нарушений.

Ключевые слова: тектоническая структура, Московский артезианский бассейн, область питания подземных вод

Для цитирования: Глухова С.А., Пинигин О.В., Расторгуев А.В. Роль присдвиговых структур растяжения в субвертикальной фильтрации водонапорной системы Московского артезианского бассейна // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2023. № 1. С. 97–109. doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2023-63-1-97-109

THE ROLE OF SHEAR TENSION STRUCTURES IN SUBVERTICAL FILTRATION OF THE WATER DRIVE SYSTEM OF THE MOSCOW ARTESIAN BASIN

Svetlana A. Glukhova^{1✉}, Oleg V. Pinigin², Alexander V. Rastorguev³

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; koval.sa95@yandex.ru

² Individual entrepreneur, Moscow, Russia; 7178973@mail.ru

³ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; alvr9@mail.ru

Abstract. Presents the results of a study in which a local dome-shaped piezometric surface of the Podolsko-Myachkovski aquifer complex was revealed in the western part of the Moscow region, the central part of which coincides with an elongated swampy depression. The results of morphostructural and geological-structural analyzes show that the depression may have a tectonic origin. Using the method of mathematical modeling, it is shown that the formation of a groundwater recharge dome is possible only due to the presence of a zone of increased permeability of the Callovian-Kimmeridgian waterproof complex, formed during the development of faults.

Key words: Tectonic structure, Moscow artesian basin, groundwater recharge area

For citation: Glukhova S. A., Pinigin O. V., Rastorguev A. V. The Role of Shear Tension Structures in Subvertical Filtration of the Water Drive System of the Moscow Artesian Basin. *Moscow University Geol. Bull.* 2023; 1: 97–109. doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2023-63-1-97-109 (In Russ.).

Введение. При проведении геологоразведочных работ с целью поисков и оценки запасов подземных вод в западной части Московской области выявлена локальная куполообразная пьезометрическая поверхность подольско-мячковского водоносного комплекса. О.В. Пинигиным отмечено, что в пределах центральной части купола находится вытянутая заболоченная впадина, в границах которой расположено оз. Глубокое, самое глубокое среди озер Смоленско-Московской возвышенности.

Учитывая современные представления о том, что деформированный осадочный чехол может встречаться в любой части платформы, выдвинуто пред-

положение, в соответствии с которым впадина может иметь тектоническое (разрывное) происхождение.

В таком случае разрывные нарушения на новейшем этапе обусловили грабенообразное развитие впадины и нарушение келловей-кимериджского водоупора, отделяющего четвертичный водоносный комплекс от подольско-мячковского водоносного комплекса. Развитие ослабленной зоны могло способствовать увеличению разгрузки подземных вод из четвертичного водоносного комплекса и в результате привести к образованию куполообразной пьезометрической поверхности подольско-мячковского водоносного комплекса.

Материалы и методы исследований. В рамках работы нами выполнен морфоструктурный и геолого-структурный анализ материалов дистанционных исследований и цифровых моделей рельефа по методике М.Л. Коппа [2005] с целью выделения и установления кинематики новейших разрывов впадины.

При помощи метода математического моделирования показано, что формирование купола питания подземных вод подольско-мячковского водоносного комплекса возможно только за счет наличия зоны повышенной проницаемости келловей-кимериджского водоупорного комплекса в пределах выявленной впадины.

Обзор литературы. В последнее время активно развивается представление о преобладании горизонтальных движений в осадочном чехле Восточно-Европейской платформы с начала кайнозоя по сегодняшнее время. Оказалось, что деформированный осадочный чехол может встречаться в любой части платформы непосредственно от форландов до внутренних частей (1000 км и более) и на любой глубине [Кропоткин и др., 1987]. Надежные свидетельства горизонтальных движений получены как о современных (инструментальные наблюдения), так и о древних (мезо- и макроструктурные наблюдения) напряжениях. Детальное обобщение литературных данных по этому вопросу показано в работе Ю.Г. Леонова [1997]. Субгоризонтальная ориентировка основных полей деформаций в пределах осадочного чехла платформы убедительно доказана в монографии М.Л. Коппа [2005].

Для центральной части Русской плиты (Московского региона) Н.Ю. Гущенко [Гущенко и др., 1999] проведено исследование мезоструктур в каменноугольных известняках с использованием методики компьютерной сепарации трещин по возрасту и показано, что в этом регионе широко развиты поля деформаций с субгоризонтальной ориентировкой главных осей напряжений. Установлен посткаменноугольный цикл деформирования, насчитывающий шесть фаз, при этом самый молодой парагенез трещиноватости пространственно совпадает с линеаментным рисунком рельефа и может иметь новейший (в том числе современный) возраст. Кроме того, выяснилось, что в полосе севернее долины р. Ока преобладают новейшие правосторонние сдвиговые горизонтальные перемещения, а главная ось современной деформационной фазы вблизи Москвы ориентирована субмеридионально, и только на самом юге Московского региона, ближе к Туле, она принимает субширотное направление [Сим, 2000].

Многолетние исследования показали, что более устойчивы горизонтальные перемещения вдоль разлома, тогда как вертикальный компонент перемещения подвержен частым вариациям, иногда намного превосходящим вековой тренд. Обусловлено это тем, что горизонтальный сдвиг — наиболее энергетически экономная форма перемещения континен-

тальных масс, поскольку не требует преодоления силы тяжести [Трифонов, 2001].

Здесь уместно отметить парадоксальный вывод Ю.О. Кузьмина [2014], основанный на анализе 50-летних геодезических наблюдений о том, что суперинтенсивные движения земной поверхности (5–10 см в год и более) происходят в асейсмичных регионах, в обстановке низких региональных деформаций.

Если учесть данные о преобладающей субгоризонтальной ориентировке основных осей напряжений в осадочном чехле платформы, то понятно, что главная геодинамическая роль в Московском регионе в новейшее время принадлежит тектоническому режиму сдвига и сопровождается сложным комплексом структур, присущим сдвиговой тектонике.

Современная активность тектонических нарушений в пределах Московской синеклизы показана В.А. Манукьяном и О.В. Пинигиным [2010] на основе морфоструктурного анализа с привлечением характеристик природных и технологических параметров: пространственное и временное распределение радона и гелия в подземных водах, колебания мутности воды в эксплуатационных скважинах, деформации обсадных колонн, нестандартное поведение пьезометрических уровней водоносных горизонтов, разрывы чугунных водоводов и др.

Результаты исследований и их обсуждения.
Морфоструктурный и геолого-структурный анализы. Район исследования приурочен к Рузскому поднятию южного крыла Московской синеклизы. Фундамент сложен породами разного генезиса архейского возраста и залегает на глубине около 1,5 км. Выше залегает осадочный чехол мощностью около 1,3 км, представленный формационными комплексами верхнего докембрия, палеозоя (девон, карбон), мезозоя (юра, мел) и кайнозоя (неоплейстоцен, голоцен).

Впадина, назовем ее Тростенской, пространственно приурочена к юго-западному замыканию Клиньско-Дмитровской гряды — крупнейшей положительной структуры Смоленско-Московской возвышенности (рис. 1, А). Занимая водораздельное пространство, впадина протягивается в субмеридиональном направлении от истоков рек Малиновка и Жуковка на юге до стрелки рек Озерна и Разварня на севере (рис. 1, Б). Длина ее составляет 32 км при ширине 0,5–5,0 км. Дно впадины заболочено и имеет слабый наклон с юго-востока (абс. отм. 205 м) на северо-запад (абс. отм. 195 м).

Морфологически Тростенская впадина разделена на два сегмента гипсометрически выраженной перемычкой в районе с. Онуфриево, что позволяло ранее рассматривать ее как две отдельные несвязанные озерные котловины, в которых сегодня сохранились реликты Тростенского и Глубокого моренно-ледниковых озер. Однако в перемычке обнаружена глубокая седловина, соединяющая котловины в единую структуру.

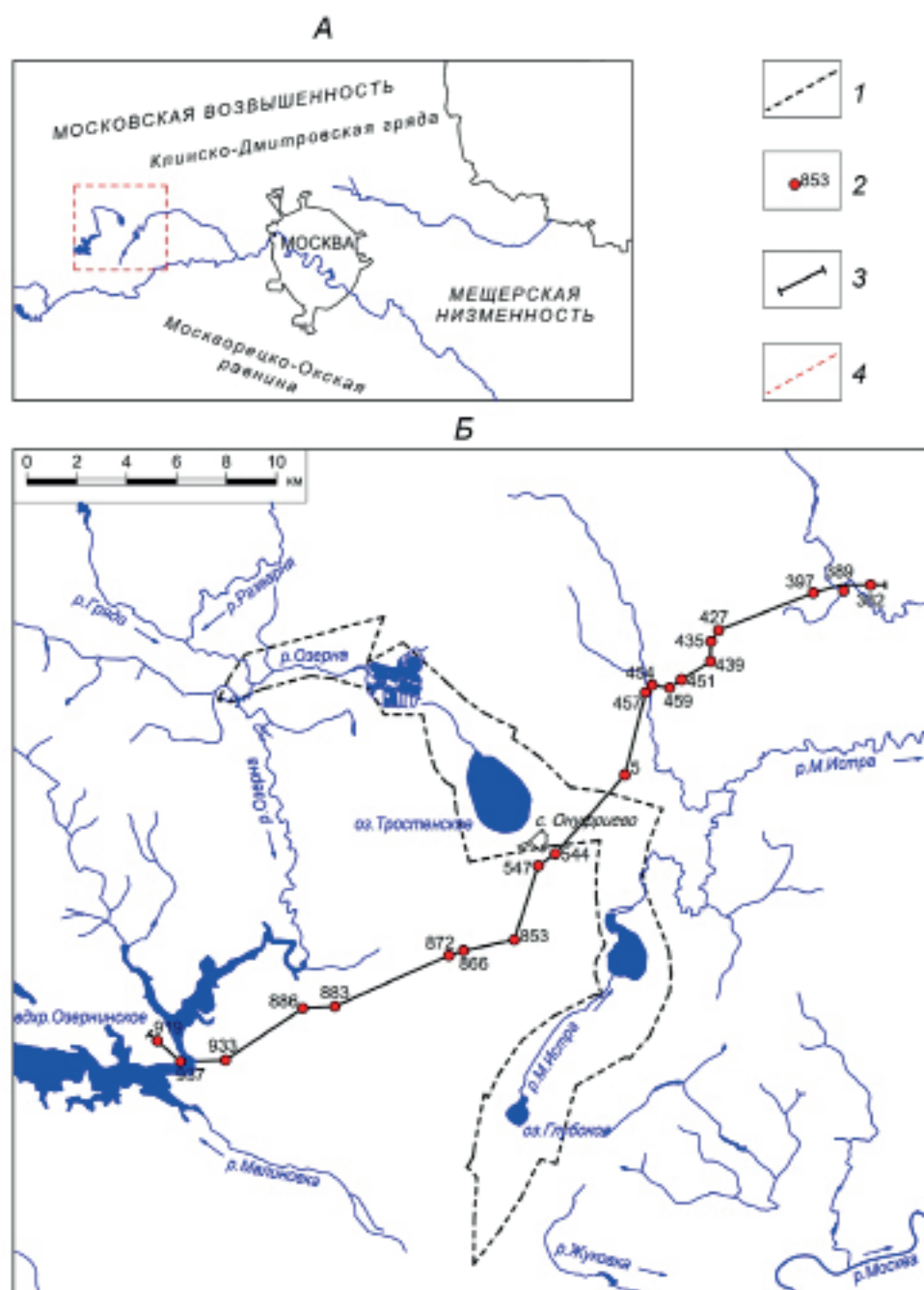


Рис. 1. Обзорная схема района исследований: А — положение района исследования в региональном плане, Б — положение Тростенской впадины в исследуемом районе: 1 — граница Тростенской впадины; 2 — скважина и ее номер; 3 — линия геолого-гидрогеологического разреза; 4 — граница района исследования (Б), также соответствует границам рис. 3–5

Отметим, что геологические условия района основательно изучены в результате бурения многочисленных картировочных и гидрогеологических скважин глубиной до 250 м, за исключением интересующей нас впадины. При геологическом картировании масштаба 1:50 000 в границах впадины было пробурено всего 3 картировочные скважины глубиной не более 30 м, что обусловлено ее заболоченностью.

Ниже представлена геолого-гидрогеологическая характеристика территории по данным исследования разреза (рис. 2). Снизу вверх выделяются: известняки протвинской свиты верхнего

подъяруса серпуховского яруса нижнего отдела каменноугольной системы мощностью до 30 м (алексинско-протвинский водоносный комплекс, C_{1al-pr}), залегающие на глубине 200–225 м. Выше находятся отложения нижнемосковского подъяруса московского яруса среднего отдела каменноугольной системы, представленные глинами верейской свиты (водоупорный верейский терригенный горизонт, C_{2vr}) мощностью до 29 м; терригенно-карбонатные отложения каширской свиты (каширский водоносный горизонт, C_{2ks}) мощностью до 50 м; глины ростиславльской толщи (водоупорный ростиславльский терригенный горизонт, C_{2rst}) мощностью до

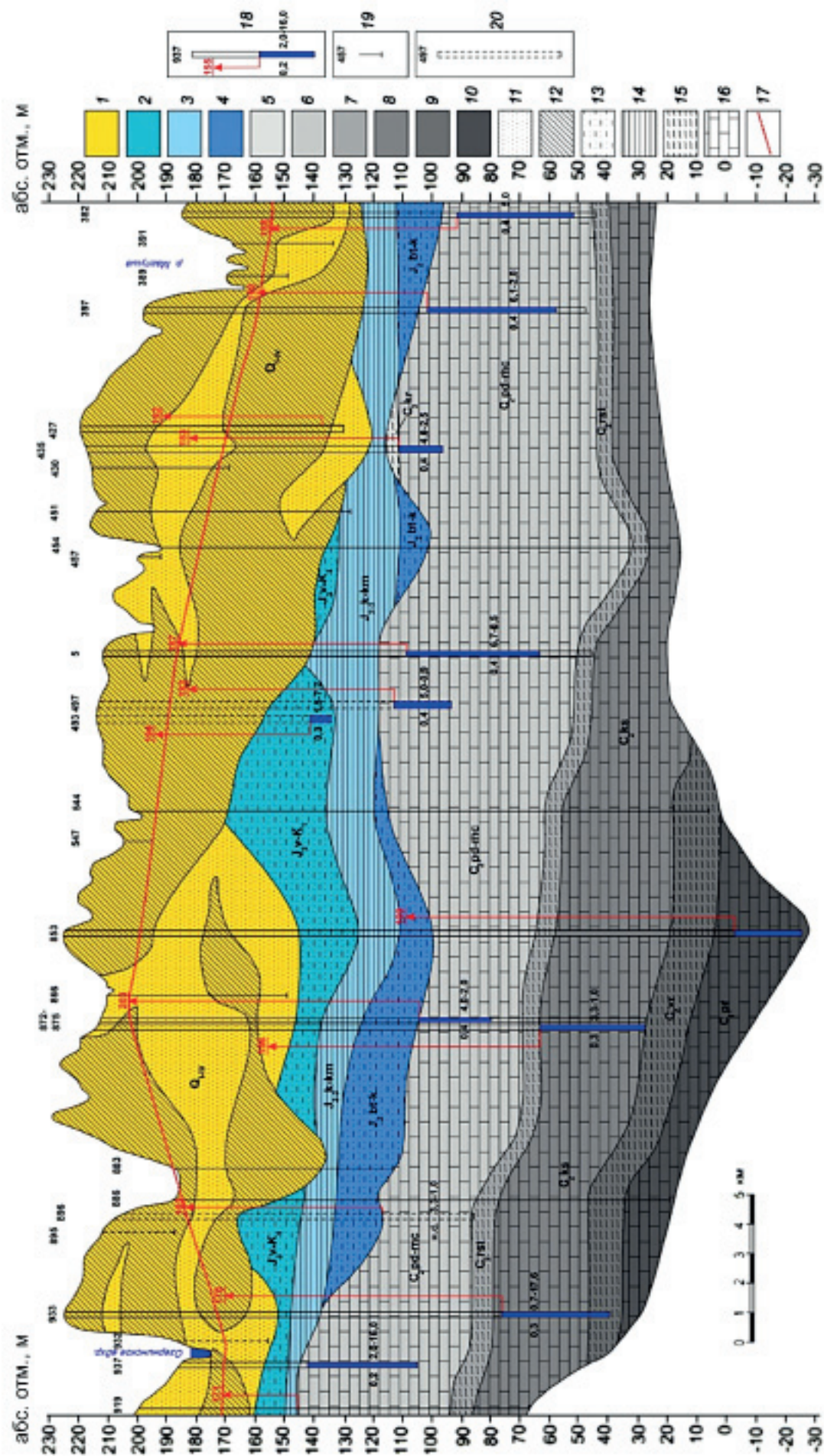


Рис. 2. Геолого-гидрогеологический разрез района исследования (линия разреза показана на рис. 1, Б): 1 — комплекс четвертичных отложений (Q_{1-IV}); 2 — волжско-меловой терригенный комплекс (J_3-K_1); 3 — келловей-кимериджский терригенный комплекс (J_2-k-km); 4 — баг-келловейский терригенный комплекс (J_2-k-k); 5 — кревьянская свита (C_3-kr); 6 — подольская и мячковская свиты объединенные ($C_2-pr-ms$); 7 — ростиславская толща (C_2-rst); 8 — каширская свита (C_2-ks); 9 — верейская свита (C_2-vg); 10 — протвинская свита (C_1-pr). Литологическая характеристика пород: 11 — песок, супесь; 12 — суглинок, глина; 13 — песок глинистый, алевроит; 14 — глина; 15 — глина аргиллитоподобная; 16 — известняк, доломит; прочее: 17 — пьезометрический уровень подольско-мячковского водоносного комплекса; 18 — скважина гидрогеологическая: сверху — номер скважины на карте, слева — минерализация (г/л); справа — дебит (л/с) — понижение (м), стрелка соответствует напору подземных вод, цифра у стрелки — абс. отн. пьезометрической: сверху — номер скважины на карте, слева — минерализация (г/л); 19 — скважина, спроектированная на линию разреза

10 м; известняки подольской и мячковской свит верхнемосковского подъяруса (подольско-мячковский водоносный комплекс, C_{2pd-mc}) общей мощностью до 57 м; фрагментарно встречаются известняки кревкинской свиты касимовского яруса верхнего отдела каменноугольной системы мощностью до 16 м (кревкинский водоносный горизонт, C_{3kr}).

При этом отложения верейской и ростиславльской толщ — основные стратиграфические маркеры и региональные водоупоры. Кровля каменноугольных отложений залегает на глубине 80–120 м, погружаясь на северо-запад. Мезозойские отложения по литолого-генетическим особенностям представлены: терригенными отложениями батского и келловейского ярусов среднего–верхнего отдела юрской системы мощностью до 25 м (бат-келловейский водоносный комплекс, J_{2bt-k}); морскими глинистыми отложениями, объединяющими келловейский, оксфордский и кимериджский ярусы среднего отдела юрской системы мощностью до 35 м (водоупорный келловей-кимериджский терригенный комплекс,

$J_{2-3k-km}$); континентально-морскими отложениями волжского ретинояруса верхнего отдела юрской и нижнего отдела меловой систем и валанжинского, готеривского и барремского ярусов нижнего отдела меловой системы мощностью до 45 м (волжско-меловой водоносный комплекс, J_{3v-K_1}). Кровля мезозойских образований залегает на глубине 20–85 м. Четвертичный комплекс (четвертичный водоносный комплекс, Q_{I-IV}) венчает разрез и представлен осадочными отложениями неоплейстоцена, главным образом ледникового происхождения, и аллювиально-озерными голоценовыми отложениями общей мощностью до 70 м.

Отметим, что полученные нами результаты геолого-структурного и морфоструктурного анализов, выполненных на основе материалов дистанционных исследований и карт цифровых моделей рельефа, предварительные, поэтому необходимо их дальнейшее детальное изучение.

Морфоструктурный анализ заключался в дешифрировании космических снимков, топографической основы и карт цифровых моделей рельефа.

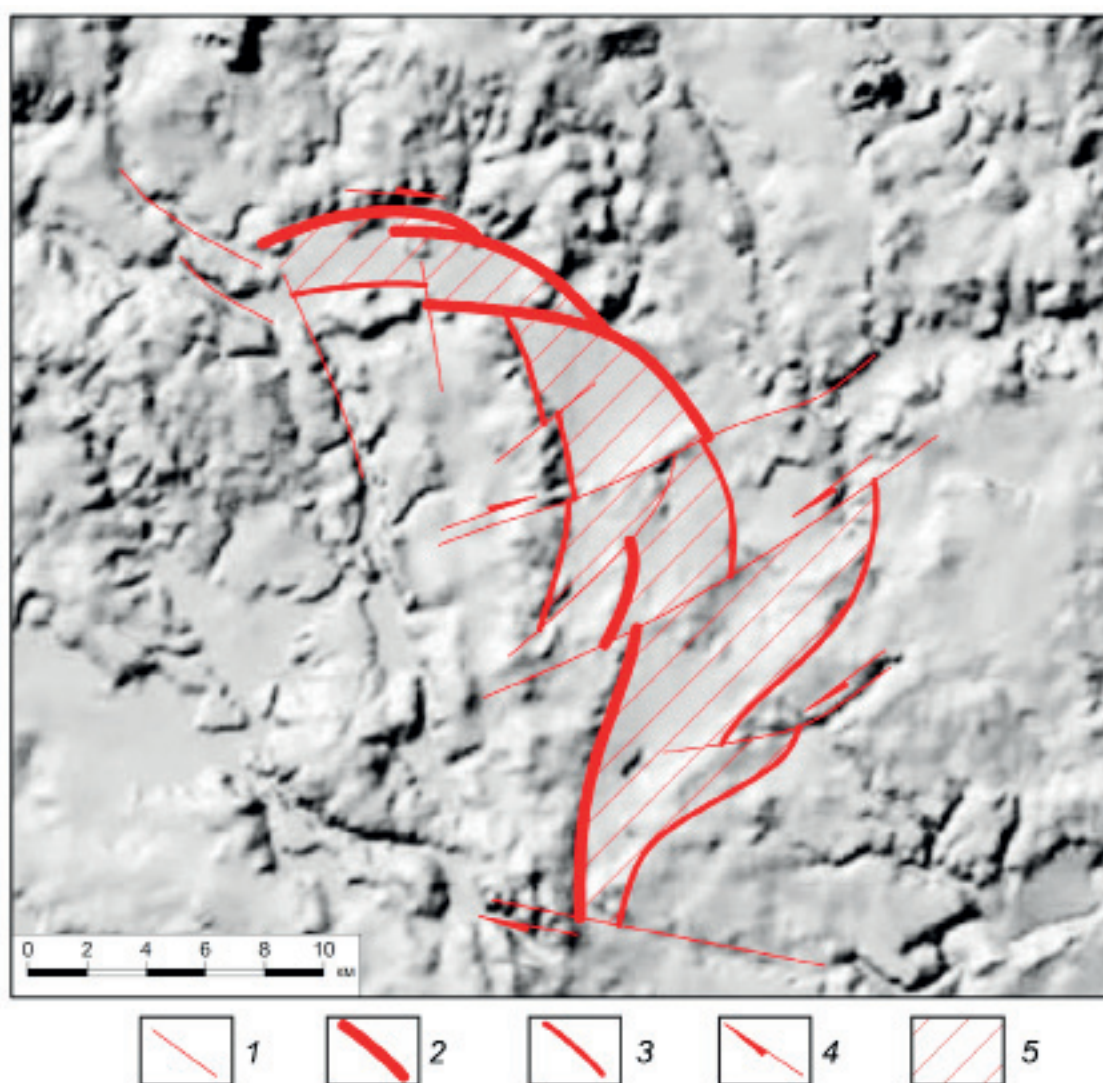


Рис. 3. Схема дешифрирования Тростенской впадины: 1 — разрывные нарушения; 2 — взброс (поднятый борт); 3 — сброс (опущенный борт); 4 — сдвиг; 5 — впадина

Если космические снимки и топографическая основа были использованы для выявления структурных элементов (линеаментов) района, то для определения кинематики выделенных линейных зон применялось дешифрирование цифровых моделей рельефа (рис. 3). При этом мы во многом придерживались методики определения кинематики разрывов на основе синтезированного дешифрирования, подробно освещенной в гл. 3 монографии М.Л. Коппа [2005].

Результаты морфоструктурного анализа показывают, что Тростенская впадина, возможно, имеет тектонические границы на всем протяжении левого и правого склонов и, кроме того, сегментирована тектоническими нарушениями северо-восточной ориентировки (рис. 3, 4).

Перемычка гипсометрически делит впадину на приблизительно равные южный и северный сегменты. Первый в южном ограничении подворачивается на восток в сторону долины р. Москва, а второй — заворачивает на запад, замыкаясь в долину р. Озерна. В плане впадина имеет Z-образную конфигурацию. Склоны сегментов впадины асимметричны. В северном сегменте восточный склон выше западного не менее чем на 30 м, а в южном — западный склон выше восточного в среднем на 30 м. В целом склоны впадины возвышаются над ее дном на 20–70 м (рис. 4).

Дугообразные ограничения впадины могут указывать на сбросовую компоненту бортовых разрывов. Такая конфигурация разрывов характерна

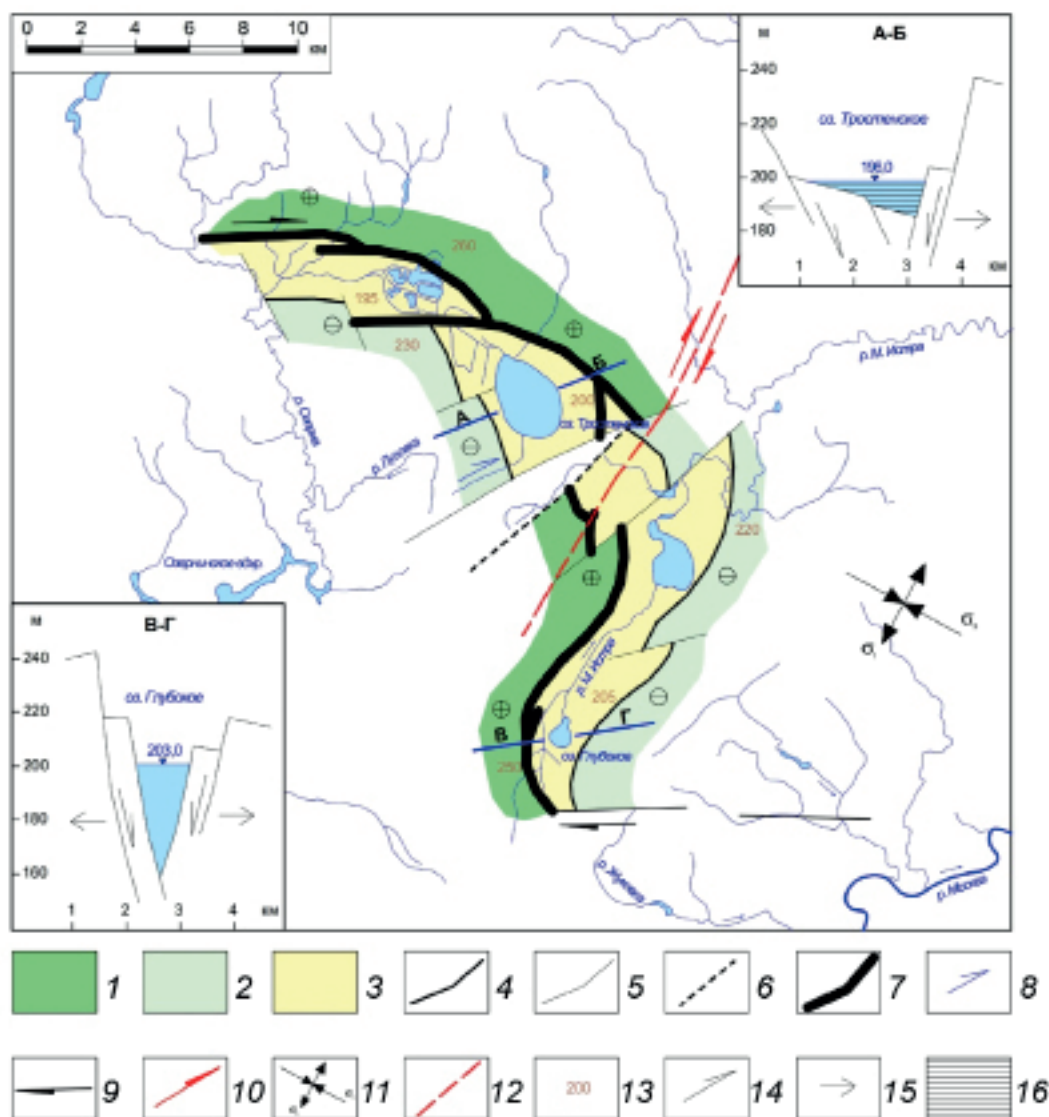


Рис. 4. Новейшая структура впадины с элементами геодинамики: 1 — граница впадины; 2 — поднятый борт впадины; 3 — опущенный борт впадины; 4 — главный бортовой разрыв; 5 — прочие разрывы; 6–8 кинематика разрывов: 6 — сброс, 7 — взброс, 8 — сдвиг; 9 — направление поверхностного сдвига; 10 — направление предполагаемого сдвига в каменноугольных отложениях; 11 — направление кинематических осей (в горизонтальной плоскости): σ_1 — максимального растяжения; σ_3 — максимального сжатия; 12 — предполагаемый тектонический разрыв в каменноугольных отложениях (показан по положению подошвы ростиславльской толщи); 13 — абс. отм. поверхности рельефа, м. На врезках — возможные варианты формирования озерных котловин: А–Б — оз. Тростенское, В–Г — оз. Глубокое; 14 — направление плоскости сместителя сброса; 15 — направление раздвига; 16 — донные отложения оз. Тростенское

для листрических сбросов континентальных рифтов, образовавшихся при явном горизонтальном растяжении [Копп, 2005]. При этом вогнутость линии разрыва направлена в сторону провисшего крыла. На сдвиговую правостороннюю горизонтальную составляющую разрывов, ограничивающих впадину, указывает их кулисное строение. Это четко видно в ограничениях поднятых бортов впадины. Разрывы, пересекающие впадину на сегменты, прямолинейны и, вероятно, имеют сдвиговую горизонтальную составляющую при субвертикальном наклоне сместителя. Их можно рассматривать как сдвиг-врезы или сдвиг-взбросы в центральной части впадины.

Правосторонний сбросо-сдвиг (?) в каменноугольных отложениях, ориентированный в северо-восточном направлении, выявлен в процессе проведения геологоразведочных работ с целью поисков и оценки запасов подземных вод в районе исследования по данным анализа структурной карты, построенной по подошве ростиславльской толщи (C_{2rst}), изучения буровых материалов и поведения магнитного поля (рис. 4).

Не вдаваясь в детали кинематики отдельных сколов и отрывов, развивающихся в зоне сдвига, отметим, что морфология Тростенской впадины подобна морфологии разрывов в осадочном чехле, полученной в результате математического моделирования простого правостороннего сдвига в фундаменте (в нашем случае в каменноугольных известняках, которые рассматриваются в качестве жесткого основания) при условии дополнительного сжатия [Ребецкий и др., 2009]. Разрывы имеют Z-образную плановую конфигурацию, сдвиг-сбросовую кинематику и изогнутую винтообразную форму вертикальной плоскости сместителя. Трещины отрыва составляют с осью сдвига угол около 35° . При этом на глубине разрывы разворачиваются в сторону оси сдвига и становятся субпараллельны сдвигу фундамента. Характерно, что в результате моделирования, так же, как и в нашем случае, наблюдается четкая асимметрия крыльев разрыва. При эволюции сдвига в приповерхностных условиях возникают растягивающие условия, приводящие к формированию присдвиговых отрывов. Подобная конфигурация структур на поверхности, сопряженная с разрывом в основании рыхлого чехла, вполне согласуется с восстановленными тектоническими напряжениями в горизонтальной плоскости, характеризующимися субмеридиональным сжатием и субширотным растяжением [Сим, 2000].

Таким образом, структура интересующей нас впадины может характеризоваться как присдвиговый раздвиг или локальный грабен. Приуроченность впадины к предположительно выделенному правостороннему сдвигу, развитому в литифицированном каменноугольном основании, может быть следствием динамического влияния разлома [Шерман и др., 1983].

В пределах впадины находятся два искусственных и два естественных водоема (рис. 1). Искусственные водоемы представлены прудом у д. Раково ($1,7 \times 0,7$ км, абс. отм. уреза воды 199 м) и обводненными карьерами торфоразработок «Брикет» ($0,8 \times 2,0$ км, абс. отм. уреза воды 193 м). Естественные водоемы представлены озерами Тростенское и Глубокое. Озеро Тростенское, третье по величине среди озер Подмосковья и самое большое в пределах Смоленско-Московской возвышенности, имеет овальную форму, площадь $5,52 \text{ км}^2$, вытянуто в длину на 3,5 км при ширине 2,1 км. Глубина озера составляет 1,1 м и лишь у восточного берега в некоторых местах достигает 3 м, абс. отм. уреза воды — 196 м. В озеро впадает маленькая речка Тростенка и один ручей. Озеро служит истоком р. Озерна и имеет две террасы голоценового возраста. Озеро расположено на территории Государственного природного заказника областного значения «Тростенское озеро и его окружение» [<https://mep.mosreg.ru>], который включает в себя днище древнеозерной котловины с оз. Тростенское в центре, с болотами и руслами малых рек, а также примыкающие моренные и моренно-водно-ледниковые равнины [<http://oopt.aari.ru/>].

Оз. Глубокое — самое глубокое среди озер на Смоленско-Московской возвышенности. При скромных размерах — длина 1,2 км, ширина 0,8 км, площадь около $0,6 \text{ км}^2$ — глубина озера составляет 32–38 м. Абс. отм. уреза воды составляет 203 м. Стоки в озеро отсутствуют, из озера вытекает р. Малая Истра. В 1891 г. на озере была организована гидробиологическая станция. Известно, что с 1891 г. по настоящее время глубина озера не изменилась. Оз. Глубокое — особо охраняемая территория регионального значения [<https://mep.mosreg.ru>]. По данным информационно-аналитической системы «Особо охраняемые природные территории России» оз. Глубокое представляет собой водоем ледникового или (по другой версии) термокарстового происхождения [<http://oopt.aari.ru/>]. В июле 2017 г. нами было организовано рекогносцировочное обследование с целью замеров глубины озера. Всего пройдено 8 профилей и выполнено 112 промеров глубины с помощью эхолота. По результатам замеров средняя глубина озера составляет 2–8 м, максимальная — 33 м (рис. 5).

Котловина оз. Тростенское, вероятно, заполнена современными осадками практически на всю глубину заложения, а в котловине оз. Глубокое современные осадки отсутствуют или их ничтожно мало. Известно, что со дна оз. Глубокое (30 м) были подняты голубые глины ледникового происхождения. Мы предполагаем, что Тростенская впадина (помимо ледникового) может иметь и тектоническое происхождение. Различие условий осадконакопления в таком случае можно объяснить двумя причинами: 1) северный сектор заложился раньше южного, и осадки в котловине о. Глубокое не успели накопиться, в этом случае возраст южного сегмента может быть поздневалдайско-голоценовым или

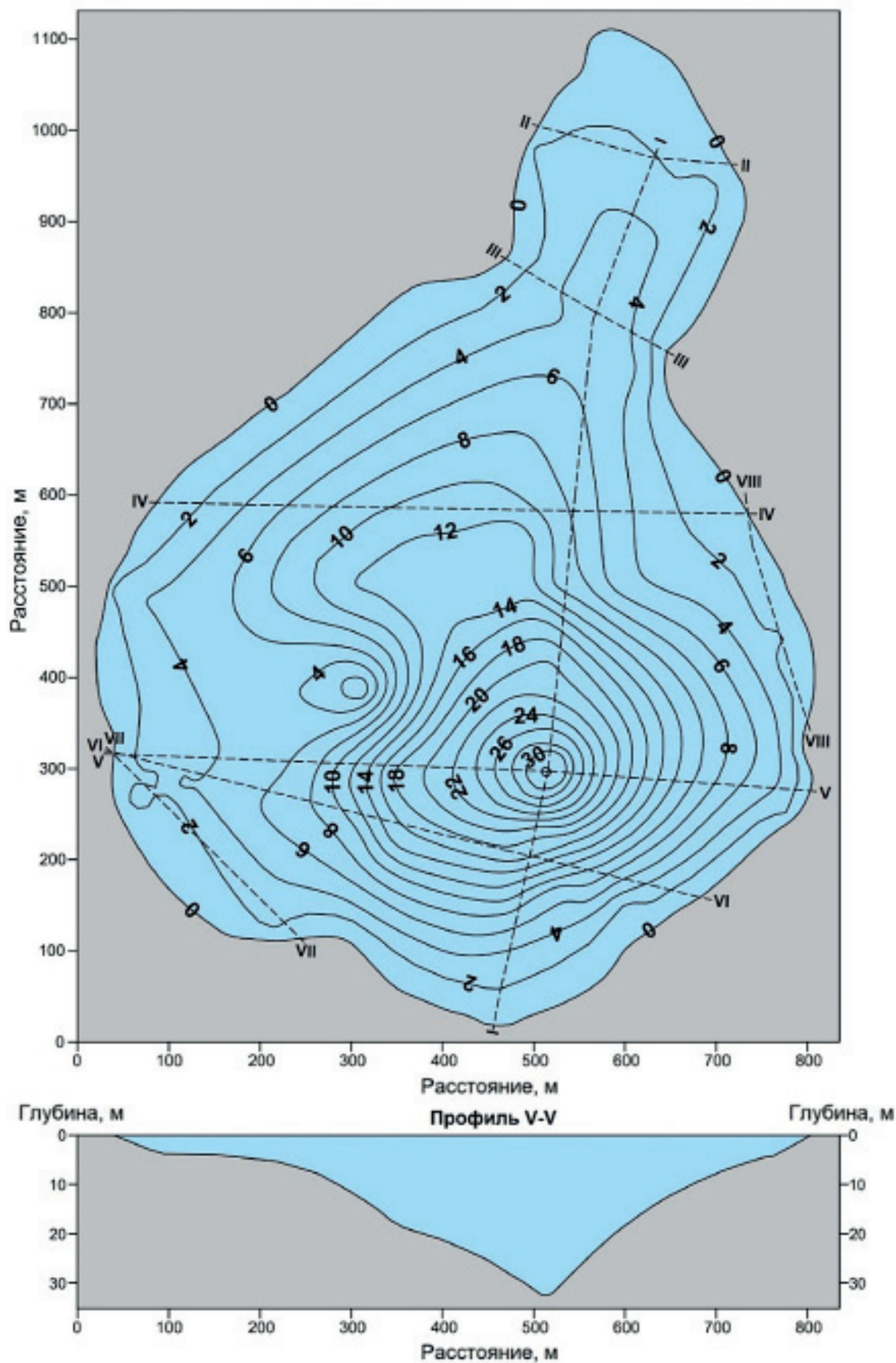


Рис. 5. Карта глубины оз. Глубокое и профиль по линии V-V

голоценовым; 2) различная интенсивность условий формирования присдвиговых растяжений в северном и южном секторах локального грабена, т. е. южная часть впадины опускается быстрее, поэтому оз. Глубокое не компенсировано осадками. Такой вариант развития секторов показан на схематических разрезах (рис. 4, А–Б и В–Г), разрывы показаны как антитетические согласно результатам аналогового моделирования структур растяжения в осадочном чехле платформ [Михайлова, 2002].

По данным бурения песчано-глинистые, предположительно аллювиально-озерные голоценовые отложения вскрыты под болотными отложениями на глубине до 30 м и, следовательно, можно предположить, что грабен заложился в позднем неоплейстоцене–голоцене и до настоящего времени погрузился минимум на 30 м, а при учете высоты бортовых обрывов — до 55–70 м.

Установление взаимосвязи между областью питания подземных вод и присдвиговой структурой растяжения при помощи метода математического моделирования. По гидрогеологическим условиям исследуемый район приурочен к центральной части Московского артезианского бассейна, в пределах которого выделяются следующие водоносные и водоупорные горизонты и комплексы: водоносный комплекс четвертичных отложений (Q_{IV}), волжско-меловой водоносный комплекс (J_3v-K_1), водоупорный келловей-кимериджский терригенный комплекс (J_3k-km), водоносный бат-келловейский терригенный комплекс ($J_{2.3}$), кревкинский водоносный горизонт (C_3kr), подольско-мячковский водоносный комплекс (C_2pd-mc), водоупорный ростиславльский терригенный горизонт (C_2rst), каширский водоносный горизонт (C_2ks), водоупорный верейский терригенный горизонт (C_2vr) и алексинско-протвинский водоносный комплекс (C_1al-pr).

При проведении геологоразведочных работ с целью поисков и оценки запасов подземных вод в 2007 г. В.А. Манукьяном была построена карта гидроизопьез подольско-мячковского водоносного комплекса и обнаружена куполообразная пьезометрическая поверхность, центральная часть которой пространственно совпадает с описанной выше Тростенской впадиной. При этом абсолютная отметка уреза воды оз. Глубокое составляет +203,7 м, а максимальная абсолютная отметка купола — +200 м. Близость уровней указывает на взаимосвязь между подольско-мячковским водоносным комплексом и вышележащим водоносным комплексом четвертичных отложений, хотя они в свою очередь разделены региональным водоупорным келловей-кимериджским терригенным комплексом. Например, подобную близость уровней можно наблюдать при наличии так называемых эрозионных окон на участках, где отсутствуют водоупорные келловей-кимериджские глины, что способствует проникновению подземных вод в нижележащие водоносные горизонты.

Возможно, формирование разрывных нарушений на новейшем этапе обусловило грабенообразное развитие Тростенской впадины и нарушение келловей-кимериджского водоупора, тем самым обеспечив разгрузку подземных вод из четвертичного водоносного комплекса в подольско-мячковский и сформировав куполообразную пьезометрическую поверхность.

При подготовке магистерской диссертации С.А. Глуховой дополнительно построена аналогичная карта гидроизопьез с использованием результатов В.А. Манукьяна и привлечением новых данных из различных технических отчетов. По конфигурации карта гидроизопьез несколько отличается от ранее построенной карты, но основная тенденция сохранилась: в центре района можно отметить наличие куполообразной пьезометрической поверхности с максимальной абсолютной отметкой +200 м и средней +190–195 м (рис. 6). При этом центральная часть купола пространственно почти совпадает с местоположением впадины.

Чтобы установить, является ли впадина областью повышенного питания подземных вод, было выполнено геофильтрационное моделирование, состоящее из двух этапов.

На первом этапе построена и откалибрована геофильтрационная модель района исследования, учитывающая повышенную проницаемость водоупорного келловей-кимериджского комплекса в пределах впадины. На втором этапе область повышенной проницаемости была исключена, чтобы проанализировать ее взаимосвязь с пьезометрической поверхностью подольско-мячковского водоносного комплекса.

Для построения геофильтрационной модели собраны, систематизированы и проанализированы различные метеорологические, гидрологические, геологические и гидрогеологические данные региональных исследований, а также материалы производственных отчетов по оценке запасов подземных вод.

Геофильтрационное моделирование выполнялось в классической версии Visual MODFLOW.

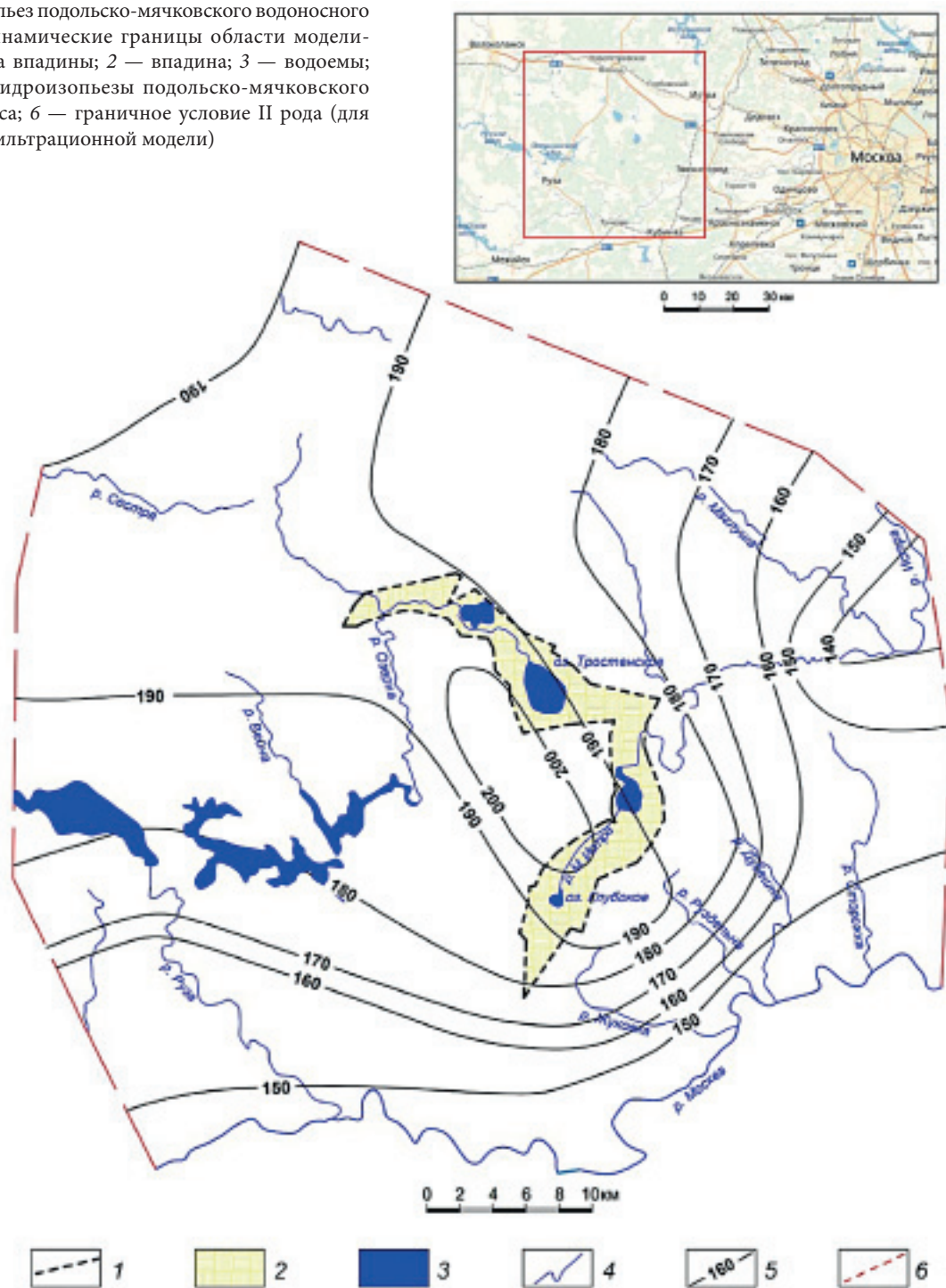
Размер области моделирования в плане составляет 3900 км^2 ($65 \times 60 \text{ км}$ по осям x и y соответственно). Размер одного блока принят равным $500 \times 500 \text{ м}$.

В модели выделено 3 расчетных слоя: 1-й слой соответствовал водоносному комплексу четвертичных отложений, 2-й слой — водоупорному келловей-кимериджскому комплексу и 3-й слой — подольско-мячковскому водоносному комплексу.

Гидродинамические границы модели следующие (рис. 6):

- на северо-западе реализовано граничное условие I рода по гидроизопьезе подольско-мячковского водоносного комплекса с абс. отм. +190 м;
- на юге граничным условием III рода служит р. Москва;

Рис. 6. Карта гидроизопьез подольско-мячковского водоносного комплекса и гидродинамические границы области моделирования: 1 — граница впадины; 2 — впадина; 3 — водоемы; 4 — водотоки; 5 — гидроизопьезы подольско-мячковского водоносного комплекса; 6 — граничное условие II рода (для геофильтрационной модели)



– западные и восточные границы проведены по линиям тока и представлены граничным условием II рода.

На модели реализована работа водозаборов подземных вод, учтенных при региональной переоценке запасов подземных вод в Московском регионе (2002), суммарной производительностью 65,1 тыс. м³/сут. Также на модели реализованы поверхностные водоемы и водотоки.

Величина инфильтрационного питания принята равной 10% от количества выпавших осадков за вычетом испарения и составила 31,7 мм/год.

Фильтрационные свойства модельных слоев охарактеризованы «эффективными» значениями коэффициента фильтрации (соответствующими преобладающему литологическому составу), они приняты на основе анализа и систематизации архивных материалов. В таблице представлены значения параметров с учетом калибровки геофильтрационной модели по уровням подземных вод подольско-мячковского водоносного комплекса.

В области развития впадины с учетом калибровки модели значение коэффициента фильтрации келловей-кимериджского водоупорного комплекса

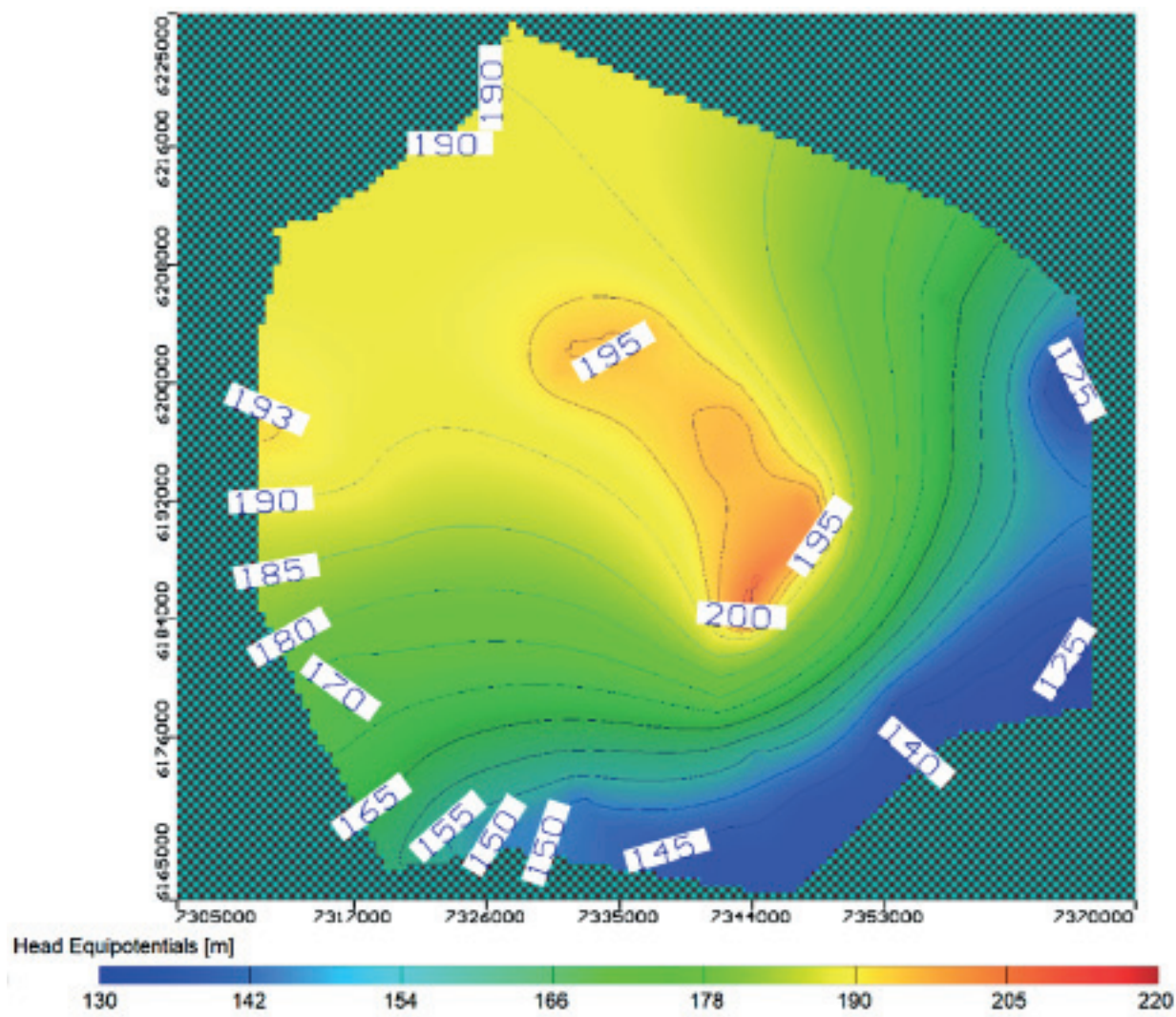


Рис. 7. Модельная карта напоров подземных вод подольско-мячковского водоносного комплекса с учетом впадины

составило 0,005 и 0,05 м/сут (в горизонтальном и вертикальном направлениях соответственно). Коэффициент корреляции при этом равен 0,907. Анализ графика корреляции показывает, что расчетные значения уровней подземных вод хорошо сопоставимы с фактическими данными. В центральной части области моделирования сформирована куполообразная пьезометрическая поверхность в 3-м расчетном слое с абсолютной отметкой +193–200 м (рис. 7), соответствующая построенной ранее карте гидроизопъез (рис. 6).

На втором этапе моделирования из модели была исключена область повышенной проницаемости келловей-кимериджского водоупорного комплекса и реализовано значение коэффициента фильтрации, как и на всей области моделирования (таблица). При этом значение коэффициента корреляции модели снизилось до 0,774, а куполообразная пьезометрическая поверхность не сформировалась (рис. 8).

Таким образом, результаты геофильтрационно-го моделирования показывают взаимосвязь между формированием зоны повышенной проницаемости и областью питания подземных вод.

Фильтрационные свойства модельных слоев			
№ слоя	Водоносный/водоупорный комплекс	Литологический состав	Коэффициент фильтрации, м/сут
1	Четвертичный водоносный	суглинки, пески	0,4
2	Келловей-кимериджский водоупорный	глины	$5 \cdot 10^{-7}$
3	Подольско-мячковский водоносный	известняки, доломиты	3

Возможно, что подобные тектонические структуры представляют собой локальные области питания подземных вод, тем самым влияют на балансовую структуру потока. Предполагаемое наличие области повышенной проницаемости в водоупорных отложениях обуславливает возможность проникновения загрязнения в водоносный горизонт.

Закключение. Выполненный структурный анализ показывает, что Тростенская впадина, возможно, имеет тектоническое происхождение и представляет собой структуру растяжения, приуроченную к

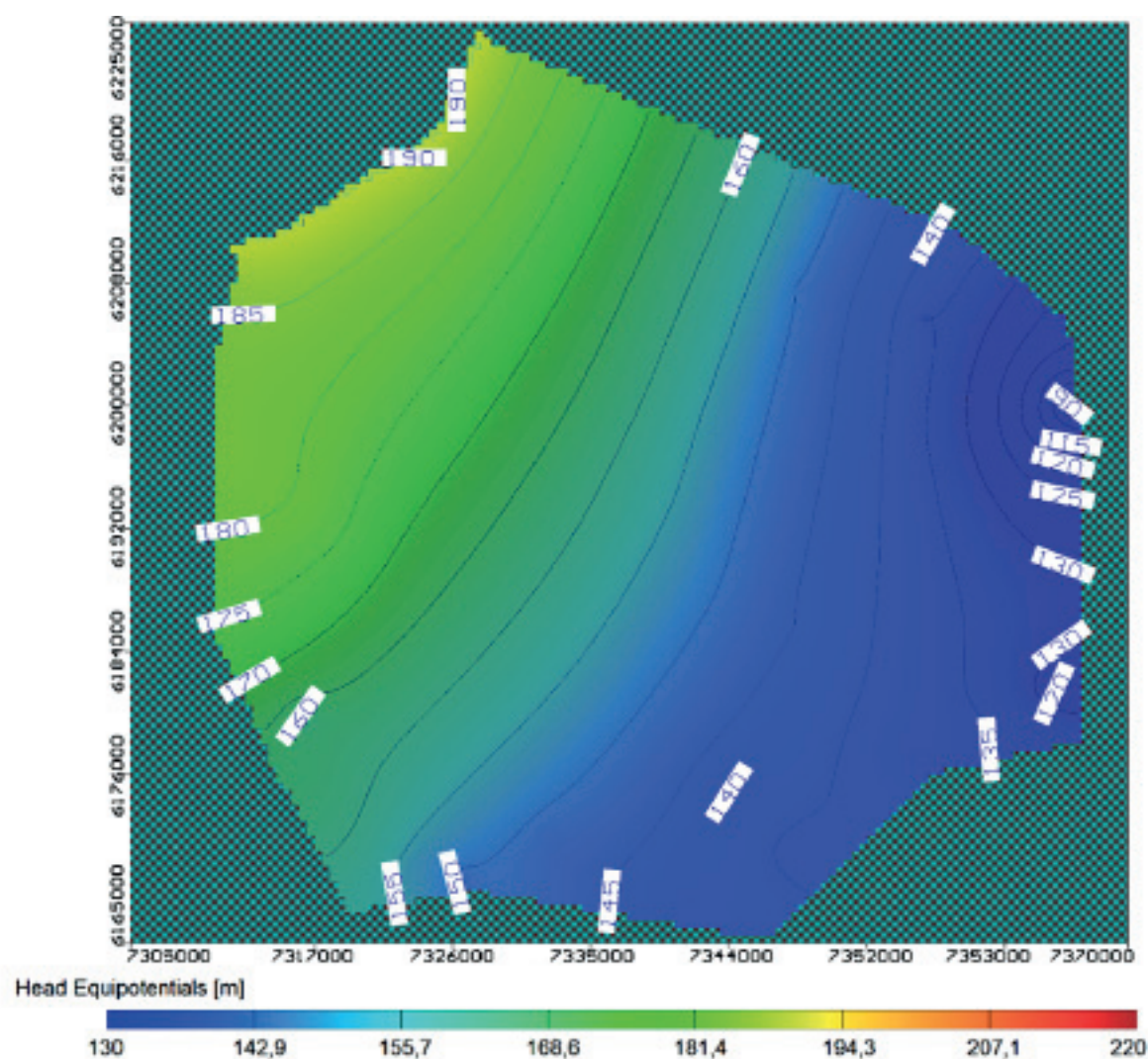


Рис. 8. Модельная карта напоров подземных вод подольско-мячковского водоносного комплекса без учета впадины

сдвигу, развитому в отложениях каменноугольного возраста.

При построении карты гидроизопьез подольско-мячковского водоносного комплекса выявлен купол питания подземных вод, пространственно совпадающий с Тростенской впадиной. Результаты геофильтрационного моделирования показывают, что формирование купола может быть обусловлено только за счет зоны повышенной проницаемости келловей-кимериджского водоупорного комплекса, разделяющего подземные воды четвертичных отложений и подольско-мячковского комплекса.

Таким образом, результаты исследования показывают, что в пределах центральной части Московского региона, вероятно, существуют присдвиговые структуры растяжения, а некоторые из впадин и озер, традиционно считающихся

ледниковыми, могут иметь и тектоническое происхождение. Структурный и морфологический изоморфизм подобных структур позволяет выделять их в пределах Московского региона и дает поисковый критерий для обнаружения областей питания подземных вод.

Выявление подобных структур также имеет важное природоохранное значение, поскольку они могут служить областями проникновения загрязнения в водоносные комплексы каменноугольного возраста, широко использующиеся в качестве источников питьевого и хозяйственно-бытового водоснабжения в Московской области.

Отметим, что полученные выводы о присдвиговых структурах растяжения и их гидрогеологической роли предположительные и служат основой для постановки дальнейших исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Гуценко О.И., Мострюков А.О., Сергеев А.А., Сим Л.А. Палеонапряжения центральных районов Русской плиты (по геологическим и геоморфологическим данным) // Докл. РАН. 1999. Т. 368, № 2. С. 230–235.

Геологическая карта СССР (серия Московская). Лист N-37-I. М.: Недра, 1988.

Информационно-аналитическая система «Особо охраняемые природные территории России»: [Электр.

ресурс] // URL: <http://oopt.aari.ru/> (дата обращения: 24.04.2022).

Котт М.Л. Мобилистическая неотектоника платформ Юго-Восточной Европы. М.: Наука, 2005.

Кропоткин П.Н., Ефремов В.Н., Макеев В.М. Напряженное состояние земной коры и геодинамика // Геотектоника. 1987. № 1. С. 3–24.

Кузьмин Ю.О. Современная геодинамика разломных зон: разломообразование в реальном масштабе времени // Геодинамика и тектонофизика. 2014. Т. 5, № 2. С. 401–403.

Леонов Ю.Г. Тектоническая подвижность платформ: факторы и соображения // Геотектоника. 1997. № 4. С. 24–41.

Манукьян В.А., Пинигин О.В. Влияние геодинамической активности земной коры на водонапорную систему южного склона Московского артезианского бассейна // Недропользование. 2010. № 1. С. 72–80.

Министерство экологии и природопользования Московской области: [Электр. ресурс] // URL: <https://mer.mosreg.ru/> (дата обращения: 27.03.2022).

Михайлова А.В. Исследование механизмов формирования тектонических структур в слое над активными

разломами фундамента в свете учения М.В. Гзовского (по результатам моделирования) // Тектонофизика сегодня. 2002. С. 212–224.

Ребецкий Ю.Л., Михайлова А.В., Сим Л.А. Структуры разрушения в глубине зон сдвига. Результаты тектонического моделирования // Докл. конференция «Разломообразование и сейсмичность в литосфере: тектонофизические концепции и следствия». М.: Изд-во ин-та физики Земли имени О.Ю. Шмидта РАН, 2009. С. 103–140.

Сим Л.А. Влияние глобального тектогенеза на новейшее напряженное состояние платформ Европы // М.В. Гзовский и развитие тектонофизики. М.: Наука, 2000. С. 326–350.

Трифонов В.Г. Живые разломы земной коры // Соросовский образов. журн. 2001. № 7. С. 46–53.

Шерман С.И., Борняков С.А., Буддо В.Ю. Области динамического влияния разломов (результаты моделирования). Новосибирск: Наука, 1983. 112 с.

Щукин Ю.К., Краснопевцева Г.В. Тектоническая делимость земной коры Восточно-Европейской платформы // Геофизика. 1996. № 4. С. 19–24.

Статья поступила в редакцию 01.12.2022,
одобрена после рецензирования 12.12.2022,
принята к публикации 12.03.2022