

ГЛОБАЛЬНОЕ ПРОЯВЛЕНИЕ ФЛЮИДОГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ В СОВРЕМЕННЫХ НАРУШЕНИЯХ ЗЕМНОЙ КОРЫ

В.А. Манукьян

Процессы деформации, происходящие в горных породах при сдвиге, нашли свое отражение в монографии В.Н. Николаевского [1]. В ней дано описание трещины, дилатансионно расширяющейся при сдвиге. В результате сдвига создается дополнительное поровое пространство. Особую важность приобретает следующее утверждение В.Н. Николаевского: «В условиях высокой тектонической активности, когда реализуются интенсивные сдвиговые усилия, земная кора подвергается гидротрансформированию, и прежде всего метеорной водой. Механизм проникновения влаги в кору связан с возникновением нового, а потому вакуумированного порового пространства трещин, которые действуют как тектонически-дилатансионные насосы».

В частном случае сдвиговых процессов В.Н. Николаевским рассматриваются события в очаге землетрясения [2]. В массиве почти одновременно отмечаются зоны сжатия и растяжения. Дополнительный объем области растяжения вытесняется во внешний упругий массив. В процессе упруго-пластической деформации происходит ее локализация в узкую полосу, которая может ускоряться в результате поступления воды в вакуумированное поровое пространство. Под действием дилатансии разлом расширяется поперек относительно сдвигающихся бортов. Расширение разлома уплотняет внешний массив, создавая в нем избыточную упругую энергию. Оценка вытесненного объема дает искомую сейсмическую энергию. На рис. 1 показана последовательность процессов, происходящих в очаге землетрясения, начиная с I этапа – роста упругих деформаций в массиве, II этапа – дилатансионного разрыхления, III этапа – компактизации с притоком воды и кончая IV–V–VI этапами – ударом и сбросом напряжений.

Рассмотрим перечисленные выше явления и последствия сдвиговой активности недр, используя данные о колебаниях давления в неглубоких артезианских структурах, а также результаты исследования динамики напряженно-деформированного состояния (НДС) недр в районе развития соляных куполов.

В соответствии с работой В.Н. Николаевского и Т.К. Рамазанова [3], колебания давления или дебита самоизливающихся скважин могут служить индикатором динамики НДС трещинных и порово-трещинных водоносных горизонтов. В подольско-мячковском

водоносном горизонте Московского артезианского бассейна (МAB) выявлены процессы перераспределения давления, аналогичные процессам, происходящим в очаге землетрясения. На рис. 2 представлена схема современных нарушений, которая является фрагментом карты, составленной О.В. Пинигиным [4]. На схеме прослеживаются сдвиги субширотного и субдолготного направлений. Современность подвижек подтверждается разрывами или деформацией обсадных колонн эксплуатационных и режимных гидрогеологических скважин, горизонтальными трещинами в необсаженных стволах скважин на глубинах свыше 100 м, а также авариями на чугунных водоводах в окрестностях современных нарушений [4].

Фрагмент схемы гидроизопьез подольско-мячковского горизонта взят из серии карт эксплуатационных водоносных горизонтов северо-запада Подмосковья, составленных автором в 2009 г. Карты построены по данным наблюдения за уровнем воды в скважинах государственной режимной сети. Дискретность замеров – 1 раз в 6–7 дней, точность замеров 1–2 см.

На схематическом гидрогеологическом профиле А–Б (рис. 3) артезианские водоносные горизонты карбона, включая (сверху вниз) касимовский $C3_{ksm}$, подольско-мячковский $C2_{pd-mc}$, каширский $C2_{ks}$ и окско-протвинский $C1_{al-pr}$, разделены соответственно водоупорными кривякинскими слоями $C3_{kr}$, ростиславльскими глинами $C2_{rst}$ и верейскими глинами $C2_{vr}$. Касимовский водоносный горизонт перекрыт сверху региональным водоупором – юрскими глинами $J_{2-3k-km}$ мощностью ~20 м. Выше залегают слабообводненные алевриты верхнеюрского-нижнемелового возраста $J_{3v-K1al}$, которые перекрыты спорадически обводненным четвертичным комплексом (Q).

За период длительной эксплуатации пьезометрическая поверхность перечисленных горизонтов снизилась на 30–50 м, достигнув к 2000 г. некоторой стабилизации. На профиле показана пьезометрическая поверхность касимовского и подольско-мячковского горизонтов. Последний, несмотря на большую сработку уровней, сохранил упругий режим фильтрации. Его мощность ~60 м. Направление потока с запада и юга на северо-восток – к водозаборам Химкинского района. Уклоны потока – от 0,0017 на юге и 0,003 в центре до 0,00125 на северо-востоке участка. Скважины режимной наблюдательной сети № 102765, 102766, 101864, 102767, расположенные на юго-западе участка, подвержены влиянию водозаборов Красногорского района Московской области. Аналогичные скважины, удаленные от первых на расстояние до 17 км к востоку (№ 101754, 101767),

расположены в районах Тушина и Сокола, где мощные водозаборные узлы отсутствуют. Несмотря на это, колебания уровня в пяти показанных на рис. 4 скважинах оказались на некотором отрезке времени тождественными по конфигурации и амплитуде.

Кривая изменения уровня скважин № 102765, 102767, 101864, 101754, 101767 «U»-образная, длительность отрицательной аномалии – до 108 сут, амплитуда снижения уровня – от 2,2 до 3,4 м, начало снижения уровня – 16.05.99, восстановление уровня – 15–22.08.99. Сква. № 102765 расположена в зоне современных нарушений (рис. 2, 4). Направление линии тока – от скв. № 102765 к скв. № 102766, конфигурация уровня которой «∩»-образная, т.е. зеркальная по отношению к первой. Разность уровней между ними на февраль-март 1999 г. составляла 1,6 м (101–99,4 м). Однако с апреля 1999 г. уровень в скв. № 102766 сравнялся с уровнем в скв. № 102765 и оставался высоким до 01.08.99, после чего снизился на 3,6 м к 12.08.99 и восстановился почти до начального февральского уровня к 22.08.99. Таким образом, в период аномального снижения уровня в скв. № 102765 и аномального повышения уровня в скв. № 102766 направление линии тока сменилось на обратное. Зная гидрогеологические параметры подольско-мячковского горизонта, полученные опытными откачками и режимными наблюдениями, можно с некоторым приближением подсчитать начальный расход потока вдоль линии тока между скважинами на февраль 1999 г., равный конечному расходу потока на сентябрь 1999 г., а также порядок цифр, соответствующий объему воды, притекшей к скв. № 102765 в период смены направлений потока, т.е. в аномальный период. Приводим исходные параметры: мощность горизонта $m=60$ м, проводимость горизонта $k \cdot m=800$ м²/сут, расстояние между скважинами $L=1250$ м. Начальный и конечный потоки при ширине линии тока $B=1$ м равны $Q=km \cdot JB$ м³/сут, где J – уклон потока, равный $\frac{\Delta H}{L}$, разница уровней $\Delta H = 1,6$ м, откуда $Q = \frac{800 \cdot 1,6}{1250} = 1,024$ м³/сут. Для подсчета количества воды, притекшей к зоне, вскрытой скв. № 102765, график уровней обеих скважин разобьем на 4 временных отрезка t (сут).

В пределах каждого из них осредняем разность уровней и, следовательно, градиент. Объем воды V определяем по формуле:

$$V = \frac{km \cdot B}{L} \times (\Delta H_1 \times t_1 + \Delta H_2 \times t_2 + \Delta H_3 \times t_3 + \Delta H_4 \times t_4) = \frac{800}{1250} \times (0,8 \times 24 + 2,9 \times 24 + 4 \times 25 + 2,4 \times 14) = 24,16 \text{ м}^3$$

Этот дополнительный объем воды оказался в современной вертикальной зоне за аномальный период поведения водоносного горизонта, равный 87 сут. Начальный объем V зоны толщиной M , равной 90 м, при мощности горизонта $m=60$ м и ширине потока $B=1$ м равен $V=90 \times 60 \times 1=5400$ м. Отсюда дополнительное приращение объема этой зоны

$$n = \frac{241,6}{5400} = 0,047 \approx 4,5\%.$$

Следует обратить внимание на дату восстановления гидрогеодинамического равновесия во всех аномальных скважинах – с 13 по 22 августа 1999 г., средняя дата – 17 августа 1999 г. Эта дата совпадает с датой Измирского землетрясения магнитудой 7,5 (Турция). Рассмотренный выше процесс развития аномального поведения уровней скважин напорного водоносного горизонта, залегающего на глубине свыше 50–70 м от поверхности, укладывается в перечисленные выше стадии формирования очага землетрясения. Сдвиги по линиям современных нарушений, вскрытых скважинами № 102765 и 102767, привели к возрастанию трещиноватости в зонах нарушения, снижению уровня воды и, соответственно, к сжатию блока, расположенного между этими зонами (скв. № 102766). Значительное повышение уровня воды в этой скважине обеспечило изменение направления потока между скв. № 102765 и 102766 на противоположный, вплоть до заполнения вакуумированных трещин и восстановления гидрогеодинамического равновесия во всех блочных структурах. Таким образом, процессы подвижек по современным нарушениям северо-запада Московской области могут быть связаны по структурам земной коры с очагом катастрофического землетрясения в Турции. Мы наблюдаем причинную связь обоих событий в общей – планетарной системе подвижек в некоторой сети разломов, сопровождающихся одними и теми же процессами дилатансии, компаксии и фильтрацией флюидов. Следует отметить, что дилатирующий разлом, проходящий рядом с эксплуатационной, оборудованной на алексинско-протвинский горизонт скв. № 707 (рис. 2 и 3), привел к деформации обсадной колонны этой скважины в июне 2009 г., а также к дренажу верховодки, связанной с участками радиоактивного загрязнения грунта.

Рассмотрим динамику НДС земной коры в районе Астраханского газоконденсатного месторождения (АГКМ). В разрезе преобладают мощные (до 3,5 км) соляные купола пермского возраста, перекрытые мезокайнозойскими осадочными породами мощностью ≥ 600 м и подстилаемые газоносными известняками карбона. В

качестве геоструктурной основы используем составленную в 1987 г. Л.Б. Аристарховой (МГУ) морфоструктурную карту участка Астраханского свода М 1:200000 (рис. 5).

Более детальные исследования тектонических нарушений кровли соляных куполов и надсолевых кайнозойских отложений выполнили в 1999 г. В.И. Николаева и В.А. Кунчеров («Спецгеофизика») на основе переинтерпретации результатов объемной сейсморазведки. Неоднородности соляных куполов (субвертикальные ослабленные зоны) исследовались А. Гарибяном в 1999 г. методом преломленных волн с использованием сейсмических данных, полученных в ходе подземных ядерных взрывов. Характерной особенностью «жизни» разломов являются выбросы глубинных газов, в частности гелия. Наблюдения за содержанием гелия в напорном хазарском горизонте показали заметное возрастание во времени его концентрации в скважинах, расположенных в зоне современных нарушений (рис. 6).

Период резкого изменения содержания гелия длился с марта 1988 г. по 16.08.99, что могло соответствовать процессу дилатансионного раскрытия сдвигов. Однако после 17.08.99 поведение гелия существенно изменилось – его концентрация стала резко снижаться. Интерпретация поведения графиков аналогична формированию очага землетрясения с восстановлением гидрогеодинамического равновесия после сейсмического события – землетрясения в Турции. В данном случае гелий является индикатором динамики НДС водонасыщенной кровли земной коры (з.к.). На глубинах свыше 600 м, т.е. внутри куполов каменной соли, НДС з. к. прослеживается с помощью гигантских гидравлических деформографов, регистрирующих сжатие и растяжение з. к. в солях на глубине ~ 1 км [5]. В соответствии с решением Н.А. Гарагаша и В.Н. Николаевского для сферической полости (подземной емкости) в каменной соли, заполненной сжимаемой жидкостью (рассолом), давление в ней определяем по формуле:

$$Pfl = P \times \frac{3(1 - \nu) \times \frac{Kfl}{K}}{2(1 - 2\nu) + (1 + \nu) \times \frac{Kfl}{K}},$$

где P – давление в каменной соли, Па; ν – коэффициент Пуассона; K – объемный модуль соли, Па; Kfl – объемный модуль флюида, Па.

При характерных значениях $K=1,437 \times 10^{10}$ Па, $Kfl=4,33 \times 10^9$ Па, $\nu = 0,268$ получаем $Pfl \approx P \times 0,5$, или $P \approx 2 \times Pfl$.

Для приведенных выше параметров давление в соли в окрестностях подземной емкости в два раза больше давления в рассоле, а колебания давления легко снимаются на устье скважины.

Рассмотрим историю образования гидравлических деформографов. В 1980-1984 гг. на территории АГКМ были созданы 15 подземных емкостей в солях на глубине ~ 1 км, полученных путем подземных ядерных взрывов, для хранения продуктов переработки конденсата. Восемь из них были заполнены конденсатом, а семь стояли пустыми вплоть до заполнения их рассолом в 1988 и 1991 гг. Генезис рассола – субвертикальная фильтрация из рапаносных зон с глубины ~3-3,5 км. В годы заполнения емкостей рассолами на Кавказе была зафиксирована высокая сейсмическая активность, подтвержденная на АГКМ дополнительным эманированием радона в режимной скв. № 102 на глубине 3700 м. Следует отметить, что большинство подземных емкостей (№ 1, 2, 5, 7, 12), а также скв. № 102 располагались поблизости от линеаментов (рис. 5). Вероятные подвижки по ним могли привести к подсосу рассолов из рапаносных зон с аномально высоким пластовым давлением вверх по субвертикальным нарушениям (ослабленным зонам) вплоть до пустых емкостей. После заполнения емкостей давление в них поднялось до 50–100 атм над устьем соответствующих скважин. Колебания давления в них отражают динамику НДС земной коры, которая подтверждается калибровкой давления по солнечному приливу с помощью образцового манометра на скв. № 2 [5]. Поведение устьевого давления в некоторых скважинах показано на рис. 7–9. На рис. 7 в скв. № 1 отмечаются одна положительная аномалия длительностью 7 сут и амплитудой 130 атм и две отрицательных аномалии длительностью ~100 и 25 сут и амплитудой до 45 атм.

Первой положительной аномалии скв. № 1 соответствует отрицательная аномалия скв. № 12 амплитудой 30 атм. Особенность длительной аномалии скв. № 1 заключается в суточном (14.06.00) всплеске давления на 50 атм перед восстановлением стабильного давления. Во второй отрицательной аномалии отмечается аналогичный всплеск давления на 10–17 атм, приходящийся на 27.11.00 в скв. № 1, 2, 5, 12 и на 25.11.00 в скв. № 7 (рис. 9). В эксплуатационной скв. № 938 глубиной ~4 км с непрерывной записью давления (рис. 8) общая длительность отрицательной аномалии амплитудой 40 атм составляет 16 сут, из которых начальный период аномалии равен 7 сут, далее подъем давления на 10 атм с 27.11.00 по 29.11.00, потом снижение давления до прежнего уровня и

восстановление с 07.12.00. Даты отмеченных повышений давления на фоне отрицательных аномалий соответствуют датам землетрясений на Каспии 14.06.00 и 25.11.00 или сдвинуты с опозданием на 2 сут.

Формирование отрицательных аномалий в толще з.к. на глубине 1–4 км отвечает картине подготовки землетрясения, которая сопровождается ударом перед восстановлением геодинамического равновесия. Первая аномалия скважин № 1 и 12 близка к процессам сдвига с дилатансионным растяжением з.к. у скв. № 12 и симметричным сжатием з.к. у скв. № 1.

Таким образом, явления дилатансии горных пород в процессе одновременных сдвигов на разных глубинах з.к. носят глобальный характер, сопровождаясь субвертикальной фильтрацией флюидов, направленной в соответствии с преобладающим градиентом давления.

Автор выражает особую благодарность С.В. Овсянниковой и А.Б. Бирюлину за оформление схемы, профиля и графиков.

Выводы

1. В процессе сдвигов з.к. по линиям современных тектонических нарушений наблюдается эффект дилатансии – формирование дополнительной трещиноватости в зоне сдвига.
2. В неглубоких артезианских бассейнах процессы вакуумирования тектонических нарушений сопровождаются подсосом грунтовых вод, верховодки и поверхностных водотоков.
3. В современных нарушениях на глубинах свыше 1–4 км аналогичные процессы сопровождаются субвертикальной фильтрацией рассолов и (или) глубинных газов.
4. Процессы деформации и движения флюидов в зоне разлома или в его окрестностях аналогичны процессам, происходящим в очаге землетрясения.
5. Восстановление гидрогеодеформационного равновесия в зонах современных нарушений завершается одновременно с мощными сейсмическими событиями (землетрясениями), удаленными от МАБ или АГКМ на расстояние свыше 700–2000 км.
6. Временная связь горизонтальных подвижек разных энергетических масштабов предполагает существование глобальной сети современных нарушений, разделяющих блоки разной степени подвижности.

7. В моменты или периоды глобального возмущения з.к. эта сеть нарушений приходит в движение, наиболее ярко проявляясь в виде землетрясений.
8. На других участках глобальной сети возможны одновременные с землетрясением катастрофические выбросы газов (например, метана на шахте Распадская и во время землетрясения на острове Суматра).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Николаевский В.Н.* Геомеханика и флюидодинамика М.: Недра, 1996.
2. *Николаевский В.Н.* Очаг землетрясения – события и предвестники удара // Экстремальные природные явления и катастрофы. Т. 2. Геология урана, геоэкология, гляциология. М., 2011. С. 316–330.
3. *Николаевский В.Н., Рамазанов Т.К.* Расчет водонапорного пласта как гидравлического сейсмографа // Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа. 1984. № 4. С. 81–86.
4. *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.
5. *Манукьян В.А.* Мониторинг напряженно-деформированного состояния соляных куполов // ДАН. 2002. Т. 384, № 3. С. 378–382.
6. *Смирнов В.И., Федоров Б.Н., Манукьян В.А., Шафаренко Е.М.* Горно-геологические процессы в подземных полостях на Астраханском газоконденсатном месторождении // Геоэкология, инженерная геология, гидрогеология, геокреология. 2000. № 3. С. 207–215.
7. *Манукьян В.А.* Оценка масштаба субвертикальной фильтрации рассолов в солянокупольных структурах // Газовая пром-сть. 2004. № 11. С. 76–79.

ПРИЛОЖЕНИЕ



Рис. 1. События в очаге землетрясения [2]

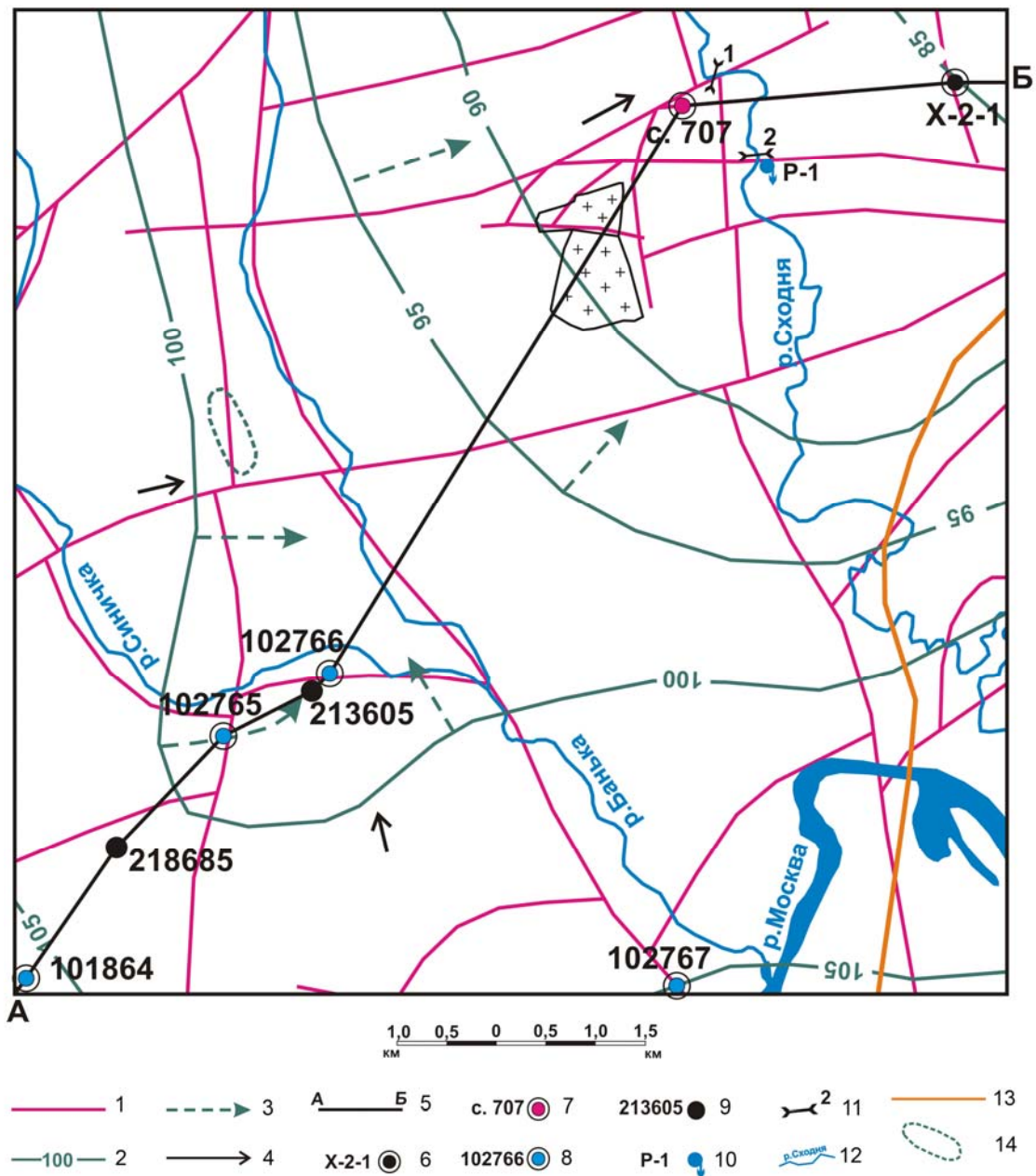


Рис. 2. Схема гидроизопьез подольско-мячковского горизонта и современных нарушений на северо-западе Подмосковья

1 – современные нарушения или ослабленные зоны; 2 – гидроизопьеза подольско-мячковского горизонта и ее Абс. отметка, м; 3 – направление движения подземных вод; 4 – направление движения блоков земной коры; 5 – линия гидрогеологического профиля; 6 – водозаборный узел (ВЗУ) и его номер; 7 – эксплуатационная скважина и ее номер; 8 – скважина государственной режимной сети и ее номер; 9 – разведочно-эксплуатационная скважина; 10 – родник нисходящий и его номер; 11 – гидроствор и его номер; 12 – речная сеть; 13 – Московская кольцевая дорога; 14 – зона бурелома после торнадо (2009 г.)

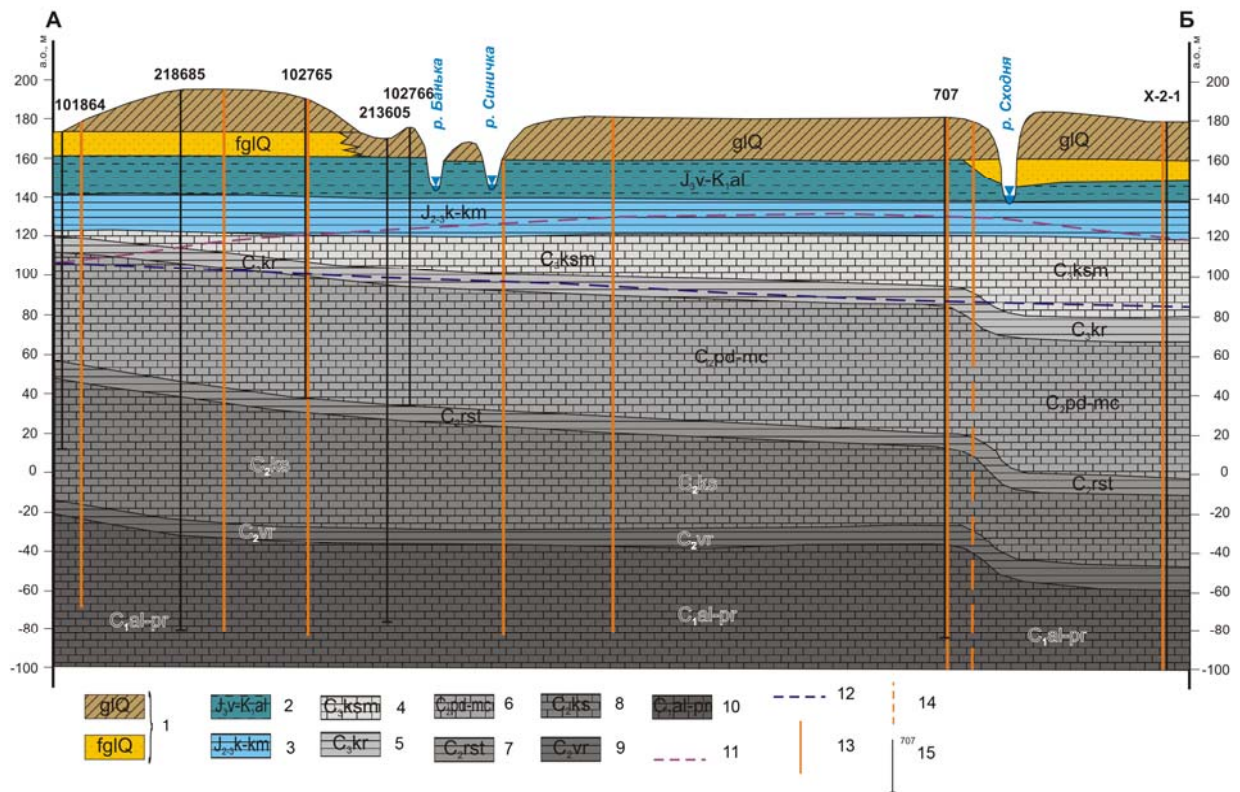


Рис. 3. Схематический гидрогеологический профиль по линии А–Б

1 – четвертичный водоносный комплекс, суглинки, пески; 2 – верхнеюрский-нижнемеловой водоносный горизонт, алевриты; 3 – средне-верхнеюрский водоупор, глины; 4 – Касимовский водоносный горизонт верхнего карбона, известняки; 5 – Кривякинский водоупор верхнего карбона, глины; 6 – Подольско-мячковский водоносный горизонт среднего карбона, известняки; 7 – Ростиславльский водоупор среднего карбона, глины; 8 – Каширский водоносный горизонт среднего карбона, известняки; 9 – Верейский водоупор среднего карбона, глины; 10 – Алексинско-протвинский водоносный горизонт нижнего карбона, известняки; 11 – пьезометрическая поверхность Касимовского водоносного горизонта; 12 – пьезометрическая поверхность Подольско-мячковского водоносного горизонта; 13 – современные тектонические нарушения; 14 – ослабленные зоны; 15 – гидрогеологическая скважина, сверху: номер

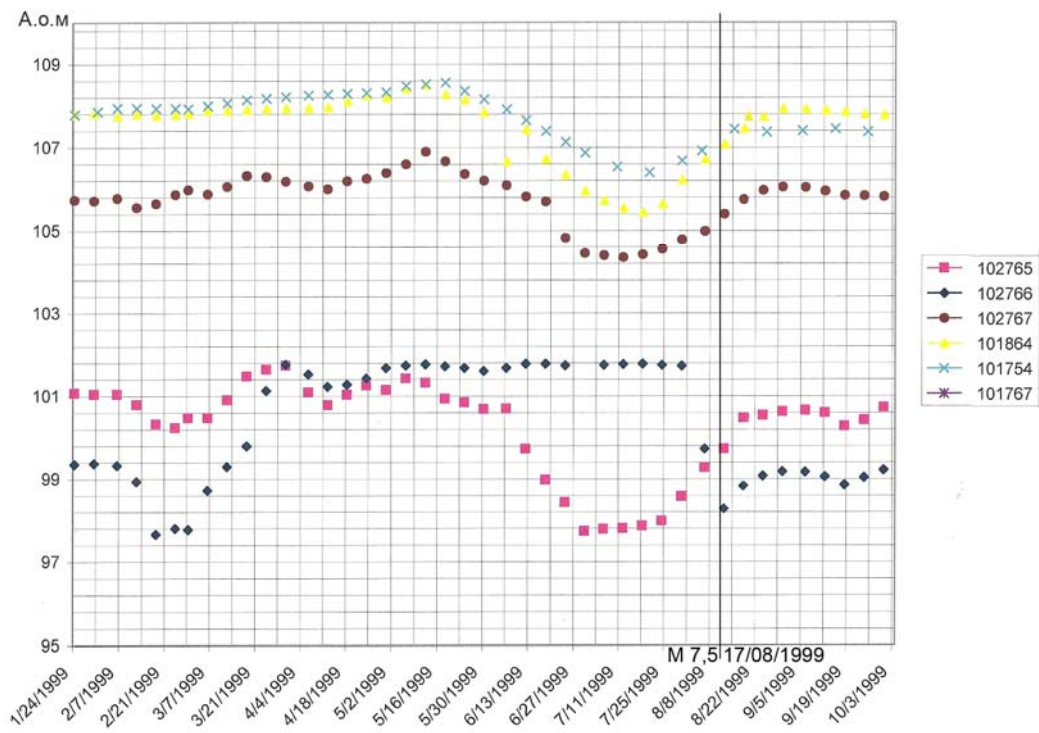


Рис. 4. Графики колебания уровня Подольско-мячковского горизонта в скважинах государственной режимной сети

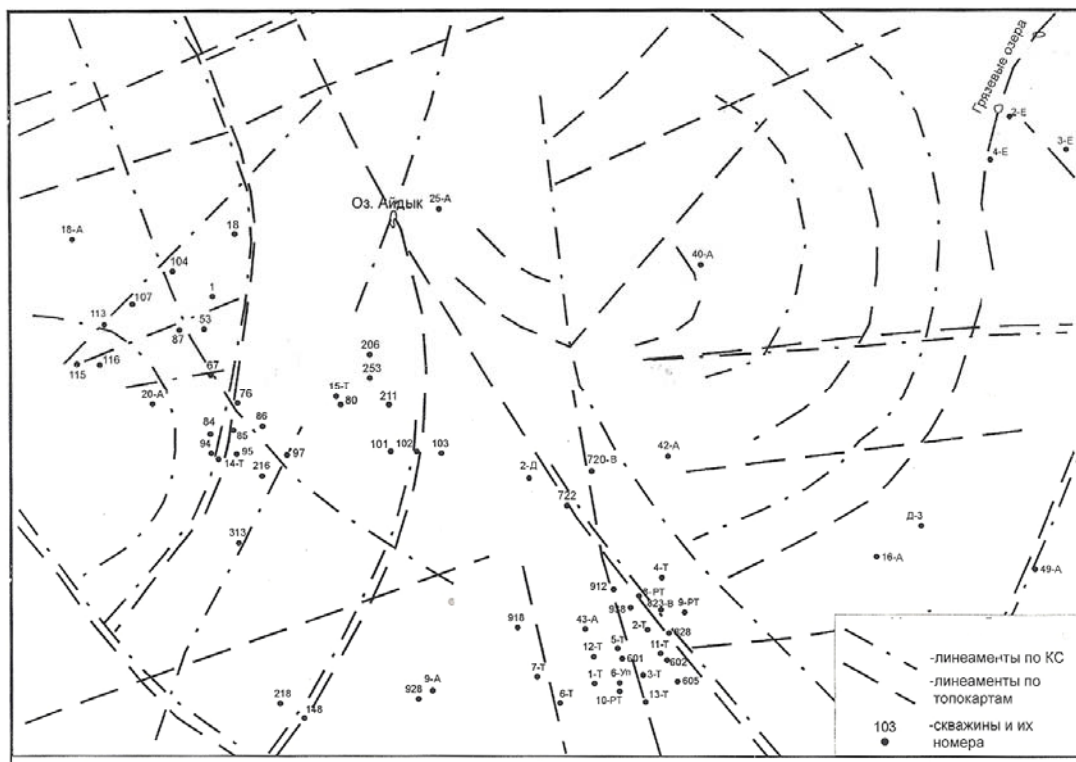


Рис. 5. Морфоструктурная схема участка АГКМ (по Л.Б. Аристарховой)

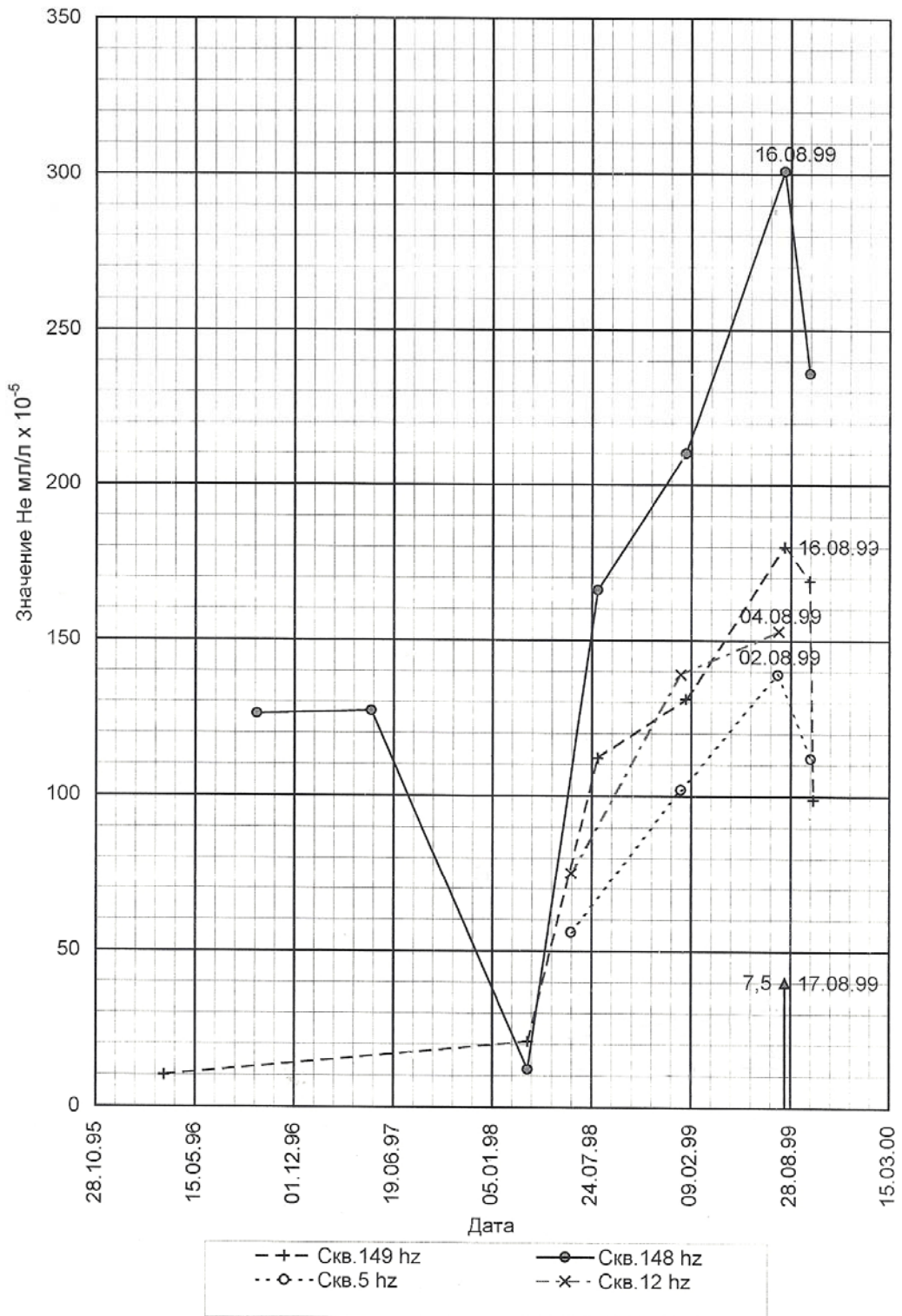


Рис. 6. Графики колебания содержания гелия в воде хазарского водоносного горизонта

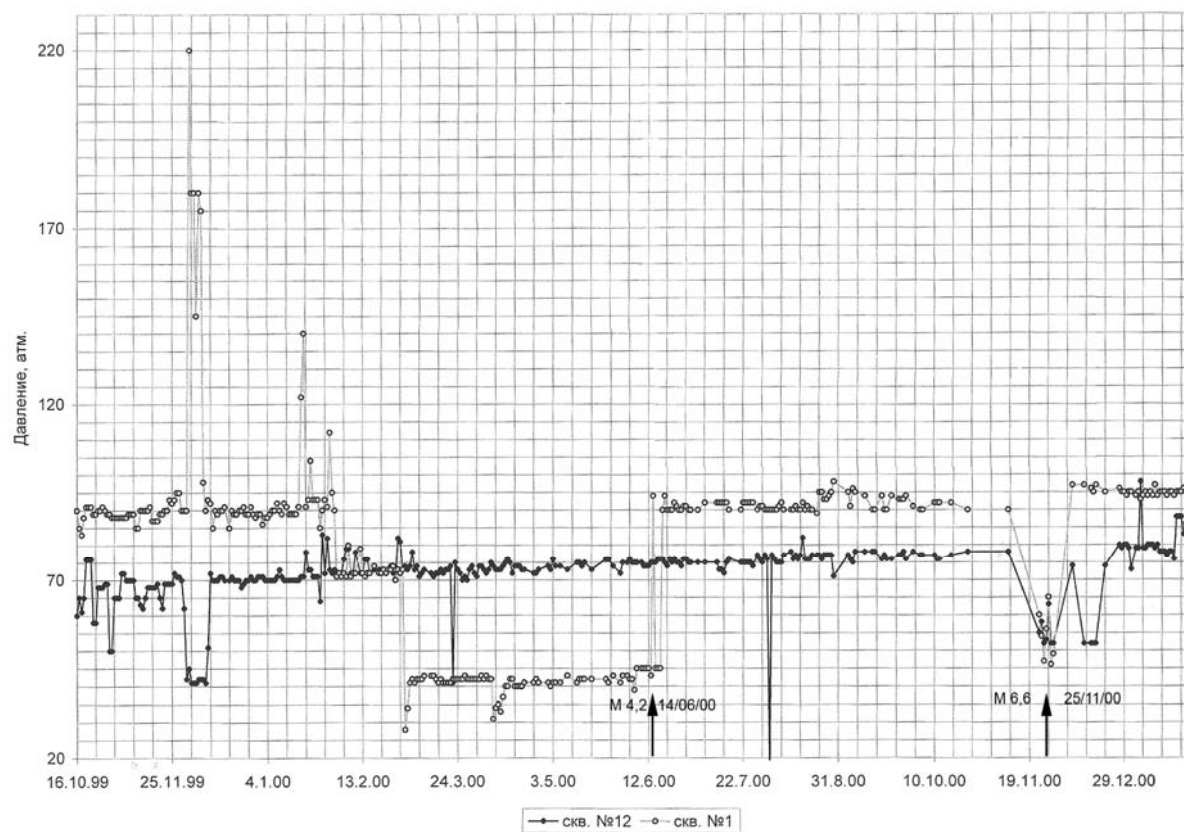


Рис. 7. Мониторинг давления в скважинах № 1 и 12

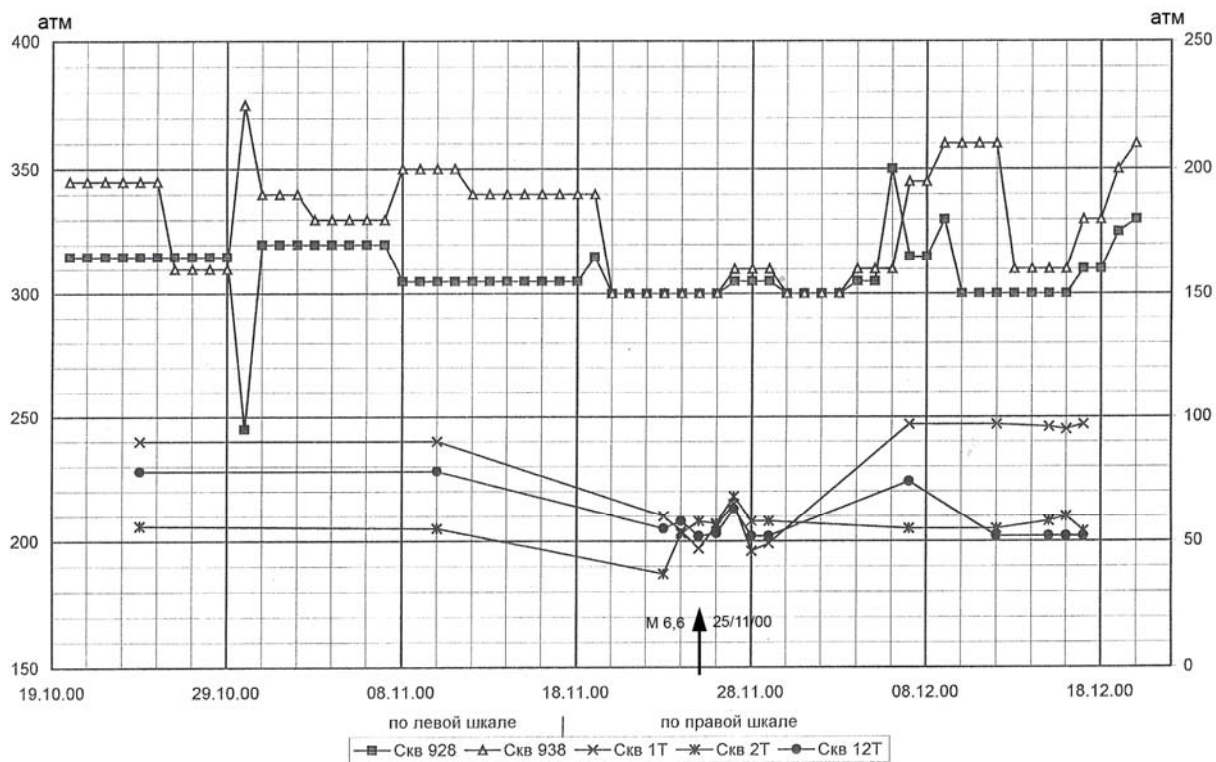


Рис. 8. Мониторинг давления в скважинах № 938, 928, 1Т, 2Т, 12Т

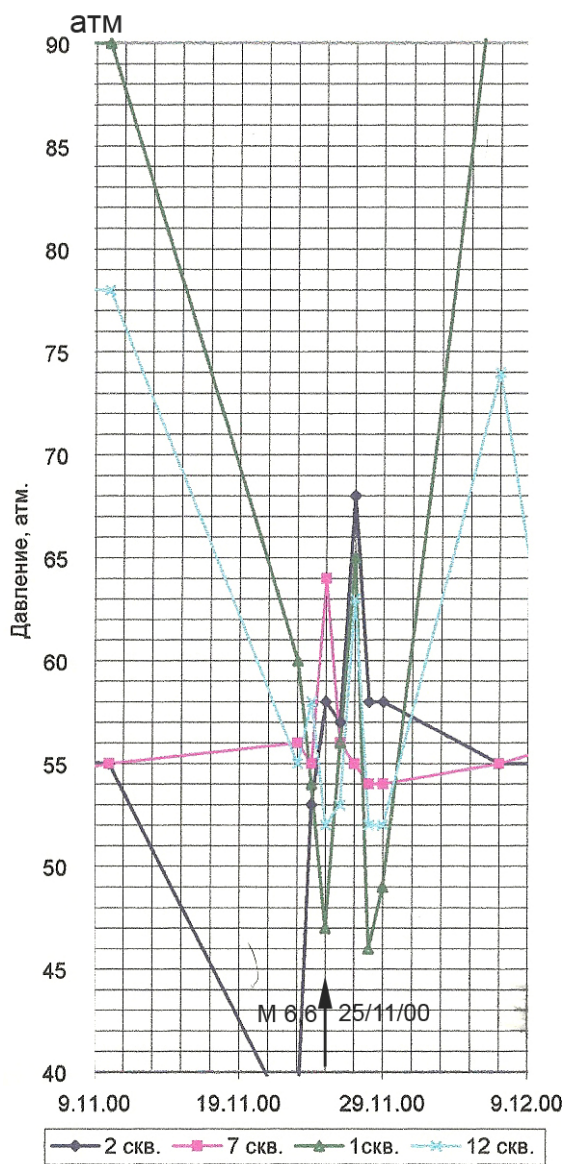


Рис. 9. Мониторинг давления в скважинах № 1, 2, 7, 12