

24. Симонов Б.Ф., Опарин В.Н., Канискин Н.А. и др. Вибросейсмическое воздействие на нефтяные пласты с земной поверхности // Нефтяное хозяйство. – 2000. – №5. – С. 41-46.

25. Шейнман А.Б., Сергеев А.И., Малофеев Г.Е. Электро-тепловая обработка призабойной зоны нефтяных скважин. – М., 1962. – 98 с.

УДК 550.831

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ИЗМЕРЕНИЙ ВЕРТИКАЛЬНОГО ГРАДИЕНТА СИЛЫ ТЯЖЕСТИ ПРИ ОЦЕНКЕ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПЛОТИНЫ КУЙБЫШЕВСКОЙ ГЭС

Ю.В.Антонов, Н.М.Яковлев\*, В.И.Жаворонкин, С.В.Слюсарев, В.Н.Чирков

Воронежский государственный университет

\*Волжское отделение института геологии и разработки горючих ископаемых, г. Самара

В комплексе с геолого-геофизическими данными рассмотрены результаты измерений вертикального градиента силы тяжести вдоль двух профилей пересекающих плотину Куйбышевской ГЭС. Показано, что плотина находится в сейсмически опасной зоне, сопряженной с мощным разломом мантийного заложения.

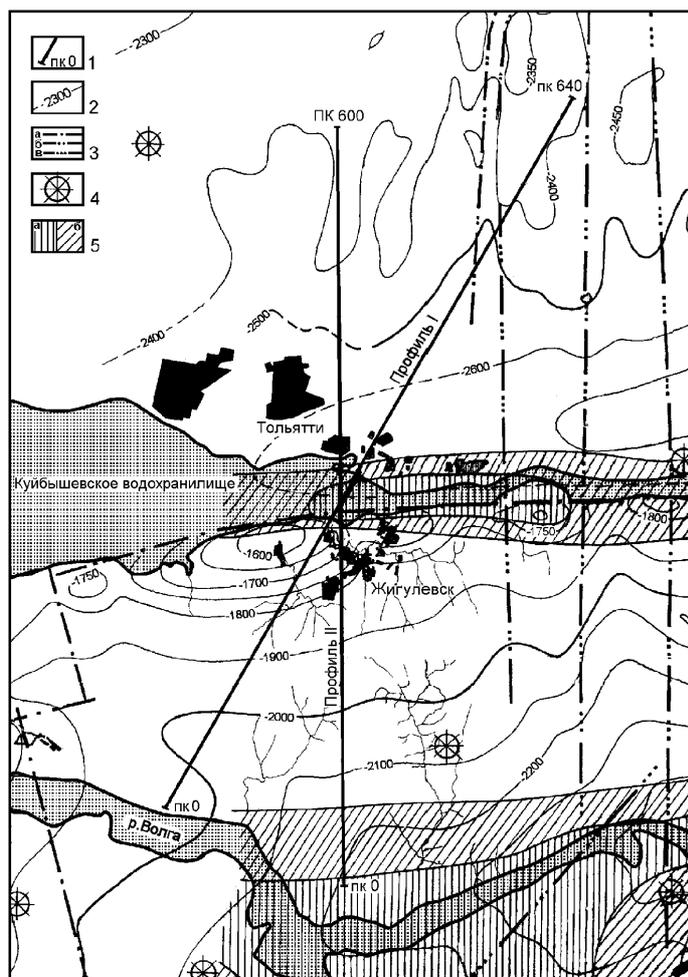
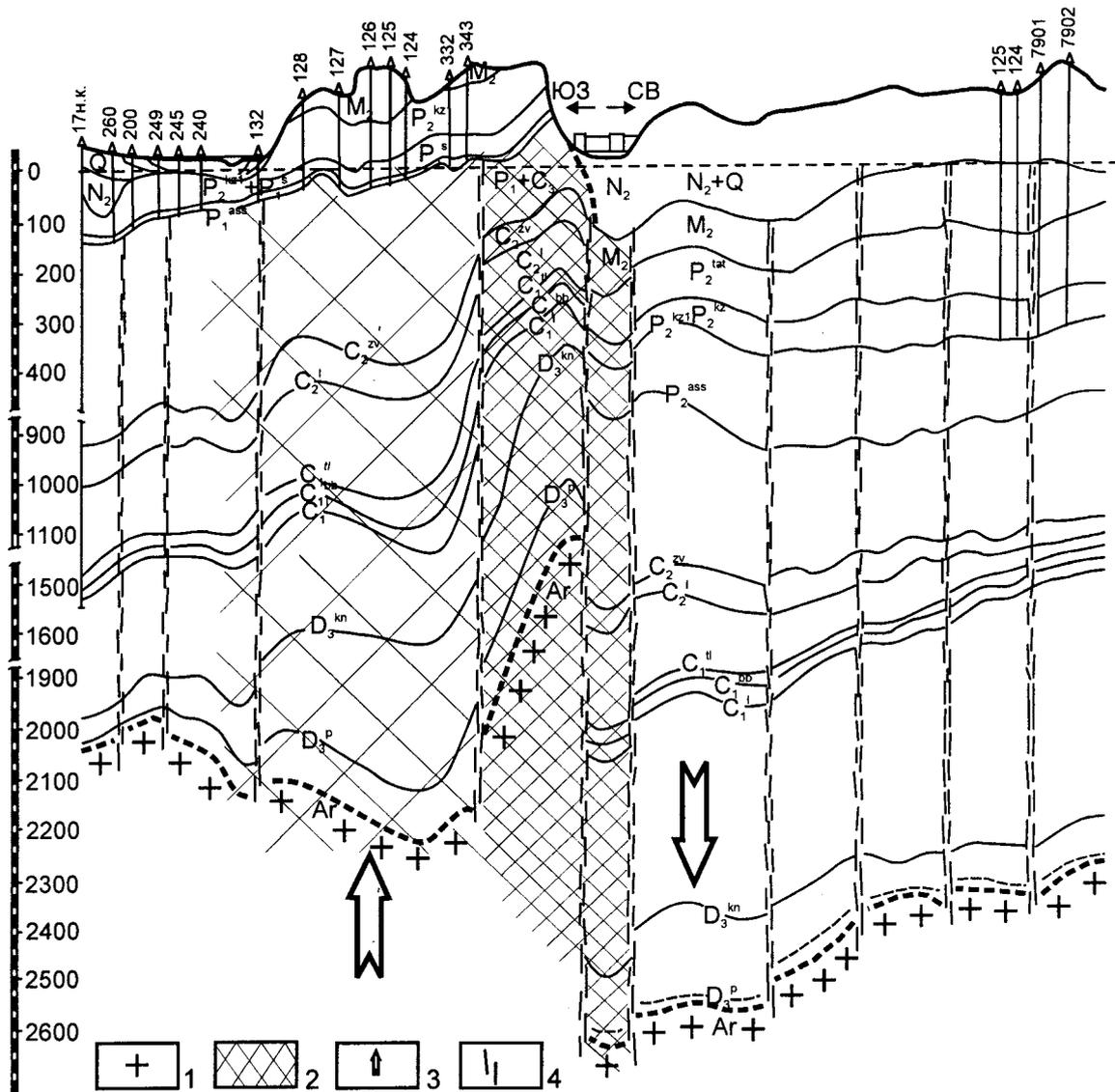


Рис. 1. Схема сейсмичности района Куйбышевской ГЭС: 1 - линии профилей; 2 - изогипсы поверхности кристаллического фундамента; 3 - разрывные нарушения (а - по геологическим данным, б - по данным сейсморазведки, в - по данным аэромагнитной съемки); 4 - эпицентры местных землетрясений; 5 - межблоковые проницаемые зоны (а) и внутриблоковые слабопроницаемые зоны.

Жигулевские дислокации на Русской платформе представляют собой уникальное явление как в ландшафтно-географическом, так и в геологическом аспектах. Ландшафтные особенности Жигулевских гор послужили естественным местом для постройки Куйбышевской ГЭС, являющейся крупным источником энергоресурсов. Но вместе с тем Жигулевские дислокации являются одной из самых активных тектонических зон на Русской платформе и могут служить источником непредвиденных бедствий, следствием которых может являться разрушение плотины ГЭС, длительное время находящейся в эксплуатации, с катастрофическими последствиями. Для оценки геологической ситуации на территории прилегающей к Саратовскому и Куйбышевскому водохранилищам, которые разделяет плотина, силами Воронежского госуниверситета и Волжского отделения института геологии и разработки горючих ископаемых (г. Самара) проведены измерения вертикального градиента силы тяжести вдоль двух профилей проходящих через плотину Куйбышевской гидроэлектростанции (рис.1).

Целевым назначением исследований было выявление тектонических нарушений и оценка их современной активности. При этом решались следующие геологические задачи:

- выявление тектонически ослабленных зон вокруг водохранилища;
- картирование разломов;
- построение геоплотностного разреза земной коры до глубины 25 км для изучения геологического строения района исследова-



**Рис. 2. Геологический разрез района Куйбышевской ГЭС:** 1 – кристаллический фундамент; 2 – зона расуплотнения пород литосферы; 3 – направления смещения блоков фундамента; 4 – зоны дробления, трещиноватости, разломов.

ний и определения глубин заложения разломных зон.

Один из отработанных профилей имеет меридиональное простирание, второй проходил с юго-запада на северо-восток. Длина каждого из них 60 км, шаг съемки 1 км, а вдоль плотины наблюдения выполнены через 200 м. Методика измерений вертикального градиента силы тяжести, разработанная и внедренная в геологические и инженерно-геологические исследования кафедрой геофизики ВГУ, изложена в работах [1-4]. Достигнутая точность измерений составила  $\pm 15$  Эгвеш.

Некоторое представление о строении исследуемой территории дает геологический разрез, построенный по данным бурения и сейсморазведки для центральной части профиля I (рис. 2). Мощность мезо-кайнозойского осадочного чехла варьирует от 1100 до 2600 м. Чехол в значительной степени дислоцирован, особенно в пределах Жигулевских гор. Рельеф кристаллического фундамента

имеет резко дифференцированный характер за счет того, что консолидированная кора разбита на разномасштабные блоки разрывными нарушениями унаследовано развивающимися на протяжении всего фанерозоя. В рамках освещенной разрезом территории выделяются два крупных блока, точнее их северная и южная периферии. Один из них, южный, испытывает долговременное поднятие, северный же опускается. Подобные тенденции наблюдаются по крайней мере с нижнего мела, о чем свидетельствуют мощности соответствующих стратифицированных толщ осадочного чехла в пределах этих блоков. На фоне долговременных поднятий в мощностях осадочных образований фиксируются изменения знака относительных перемещений блоков. В граничной зоне между этими блоками по сейсмическим данным установлен значительный по амплитуде выступ докембрийского основания. Верхняя часть консолидированной коры и осадочный чехол в пределах этой зоны в значительной степени разуплот-

нены и отвечают зоне динамического влияния широтного разлома, вдоль которого течет на данном отрезке р. Волга (см. рис. 1).

На рассматриваемой территории ранее был выполнен комплекс региональных геофизических исследований. В частности, указанная территория покрыта гравиметрической и магнитной съемками масштаба 1:200 000 (рис. 3 и 4). Для этой территории в том же масштабе построена карта сейсмичности, на которой определены зоны повышенной проницаемости земной коры, вынесены эпицентры местных землетрясений и намечены крупные разломные нарушения (см. рис. 1). Имеются также схема изогипс фундамента и в незначительном объеме сведения о петрофизических характеристиках горных пород, слагающих кристаллический фундамент. Эти материалы позволяют судить о тектонической обстановке в региональном плане. Для надежных выводов об инженерно-геологическом состоянии плотины и геодинамической обстановке в ее районе необходимы более детальные исследования примерно тем же комплексом, включая и новые геофизические методы. Потому, в частности, привлечен метод вертикального градиента силы тяжести.

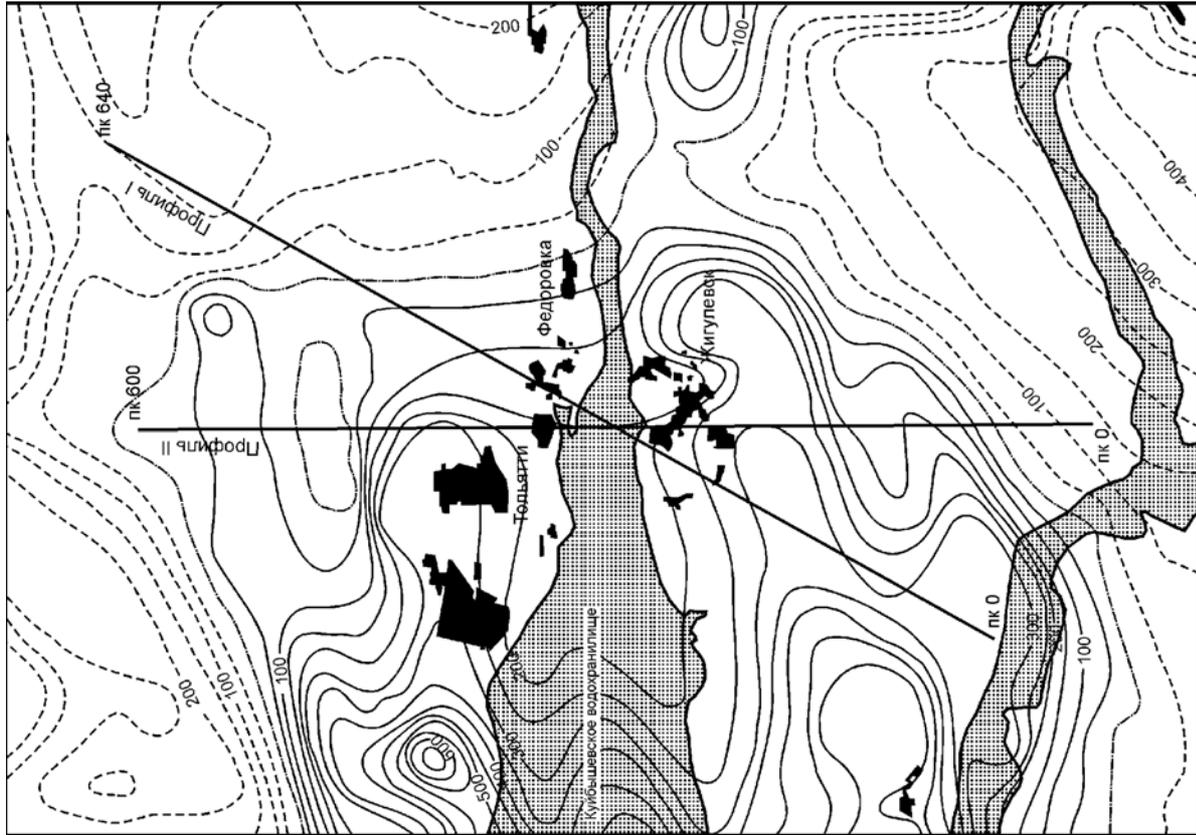
Выбор его, как основного инструмента исследований, диктовался тем, что градиентометрические измерения весьма эффективны при инженерно-геологических исследованиях, позволяют напрямую оценить активность тектонических нарушений, а также дают возможность с высокой степенью точности определить глубины залегания плотностных неоднородностей в земной коре [1-7]. Измерение градиента имеет ряд технологических преимуществ перед съемкой силы тяжести. В частности, так как при съемке градиента измеряется абсолютная величина, то нет необходимости в разбивке опорной сети. Кроме того, в отличие от измерений силы тяжести, снижены требования к высотной привязке. Она может осуществляться по картам масштаба 1:50 000 и крупнее.

На первом этапе исследований нами рассмотрены особенности регионального расположения Жигулевских дислокаций на Русской платформе. С этой целью была построена геоплотностная модель на основе гравитационной карты силы тяжести в редукции Буге ( $\sigma = 2,3 \text{ г/см}^3$ ) масштаба 1:2 500 000 (рис. 5). Интерпретационный профиль проходил в меридиональном направлении от Нижнего Новгорода вдоль Волги и заканчивался в Прикаспийской впадине. Методика подбора геоплотностных разрезов по аномалиям силы тяжести подробно изложена в [7,8]. При интерпретации были рассмотрены два варианта. В первом случае подбор осуществлялся по исходному полю силы тяжести без каких-либо преобразований, во втором - предварительно был исключен эффект притяжения толщи осадочных отложений до границы с кристаллическим фундаментом. Результаты этих расчетов даны на рис. 5 в виде распределения избыточных изоплотностей в вертикальной плоскости до глубины 120 км. Каких-либо

принципиальных отличий между изоплотностными разрезами в региональном плане в обоих случаях не наблюдается. В результате подбора было установлено, что в районе Жигулей имеется крупный региональный глубинный разлом мантийного заложения (более 120 км по глубине) который может служить каналом поступления и накопления энергии от дальних землетрясений, связанных с альпийскими зонами складчатости.

Более детальное представление об этой зоне в районе Жигулевских дислокаций дают результаты среднемасштабной гравиметрической съемки, представленные на рис. 3. Руслу Волги в гравитационном поле соответствует локальный минимум амплитудой порядка 20 мГал. Анализ геологических данных свидетельствуют о том, что он мог быть по интенсивности значительно больше, но его амплитуда уменьшена за счет следующих факторов. В частности, рассматриваемый минимум с юга убывает к Волге, в то время как кровля кристаллического фундамента резко поднимается вверх (см. рис. 1), и за счет избытка плотности создает положительную аномалию силы тяжести, которая в значительной степени компенсирует амплитуду отрицательной аномалии. Высота выступа фундамента превышает 600 м. Ко второму фактору можно отнести то, что фундамент в той части, где располагается минимум силы тяжести, скорее всего сложен основными и ультраосновными породами. Породы основного состава (предположительно габброиды) вскрыты единичными скважинами, и фиксируются в магнитном поле положительными значениями (см. рис.4). Следовательно, амплитуда минимума силы тяжести уменьшена и за этот счет. Причем, судя по магнитному полю, массив (или группа массивов) основных пород имеет значительные размеры и должен создавать интенсивную положительную гравитационную аномалию. Таким образом, с учетом рассмотренных обстоятельств, сделанный ранее вывод о глубоком заложении разлома представляется достаточно обоснованным. В магнитном поле достаточно четко проявляется серия разломных нарушений меридионального направления более высокого ранга. Такие нарушения подтверждаются комплексом геологических, геофизических и аэрокосмических данных. Часть из них отображена на рис.1. Отметим еще одно нарушение, которое ранее не выделялось и которое будет важным при рассмотрении результатов градиентометрических измерений. Этот разлом пространственно совпадает с профилем II и фиксируется в магнитном поле характерным поведением изолиний. Частично нарушение отмечается в гравитационном поле и в характере изогипс кровли фундамента.

Обратная задача была так же решена по гравитационному полю масштаба 1:200 000, в результате построен геоплотностной разрез по профилю I до глубины в 60 км (рис.6). Указанный выше широтный региональный разлом четко и в тех же пре-



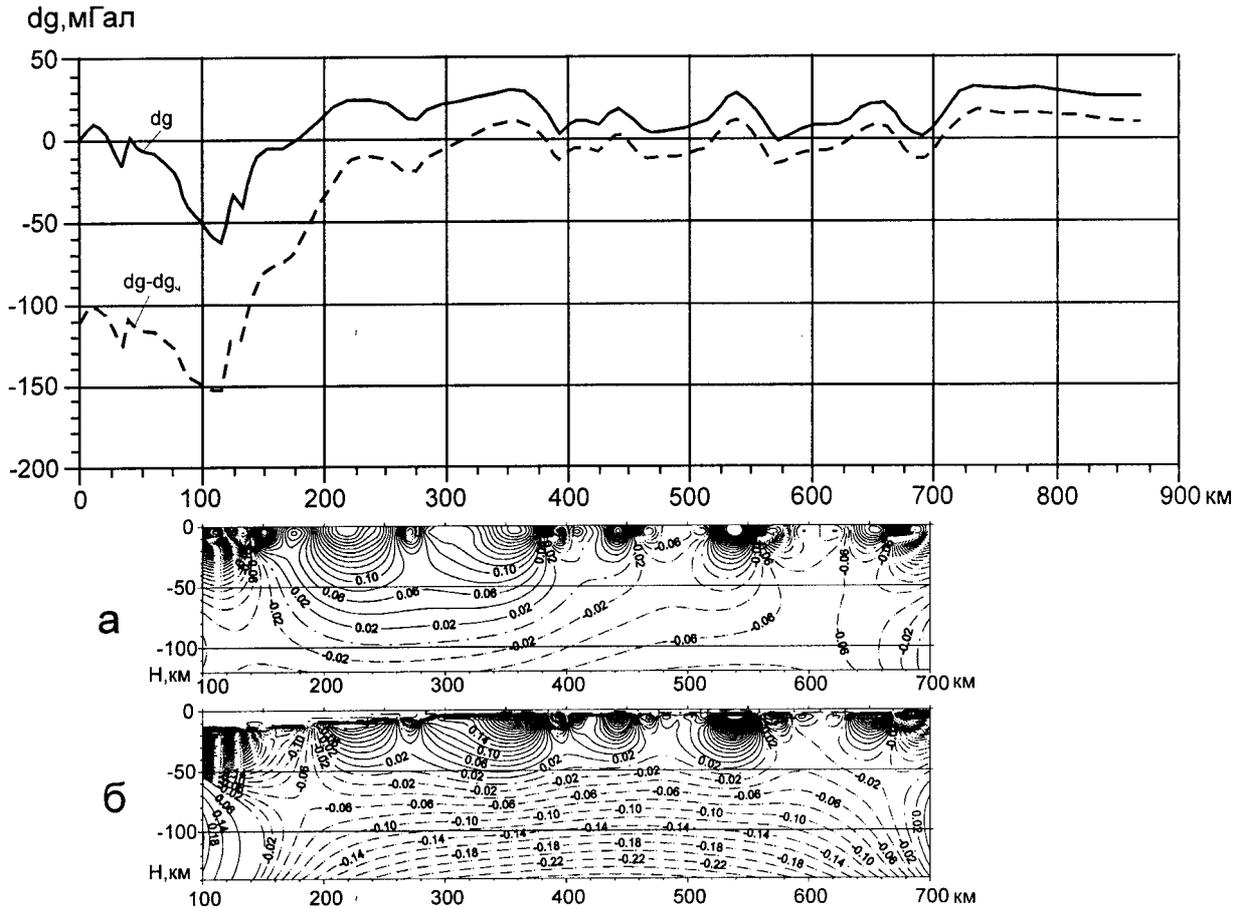


Рис. 5. Распределение эквивалентных плотностей по результатам решения обратной задачи: а – без учета влияния рельефа фундамента; б – с учетом влияния рельефа фундамента.

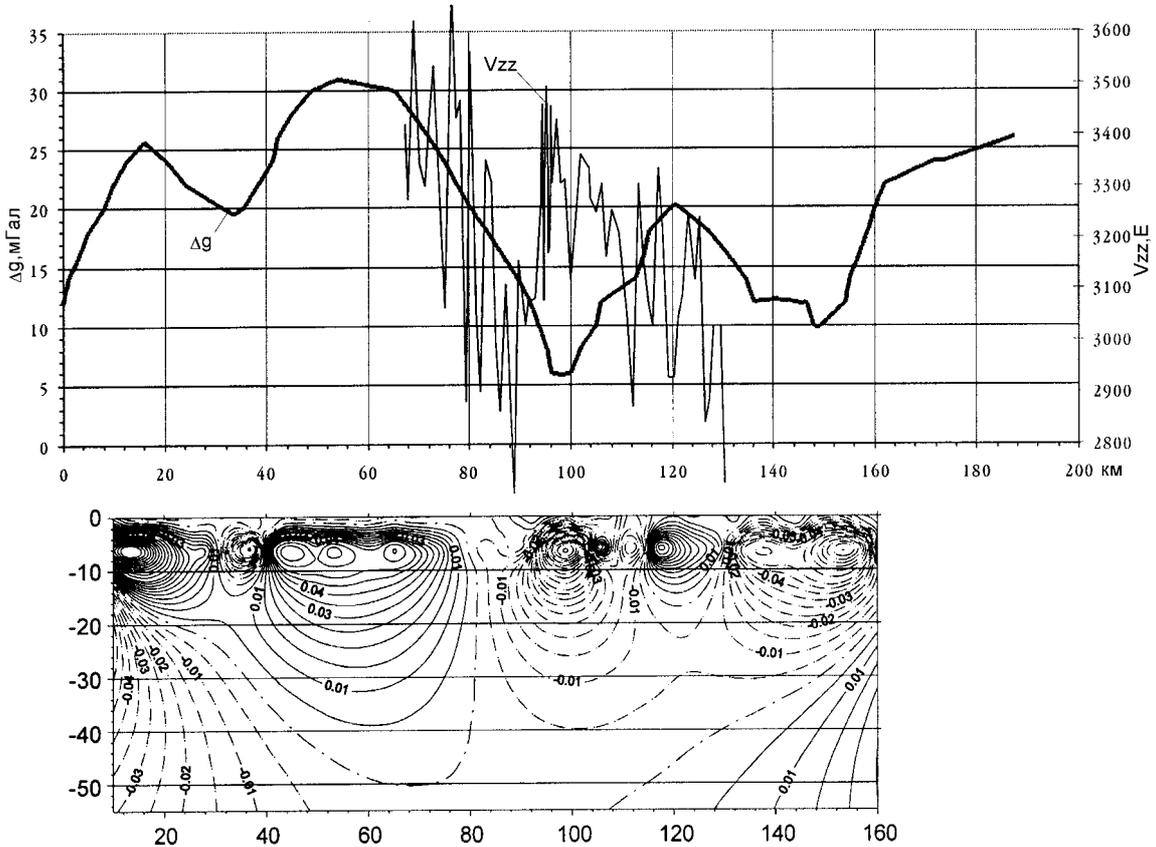
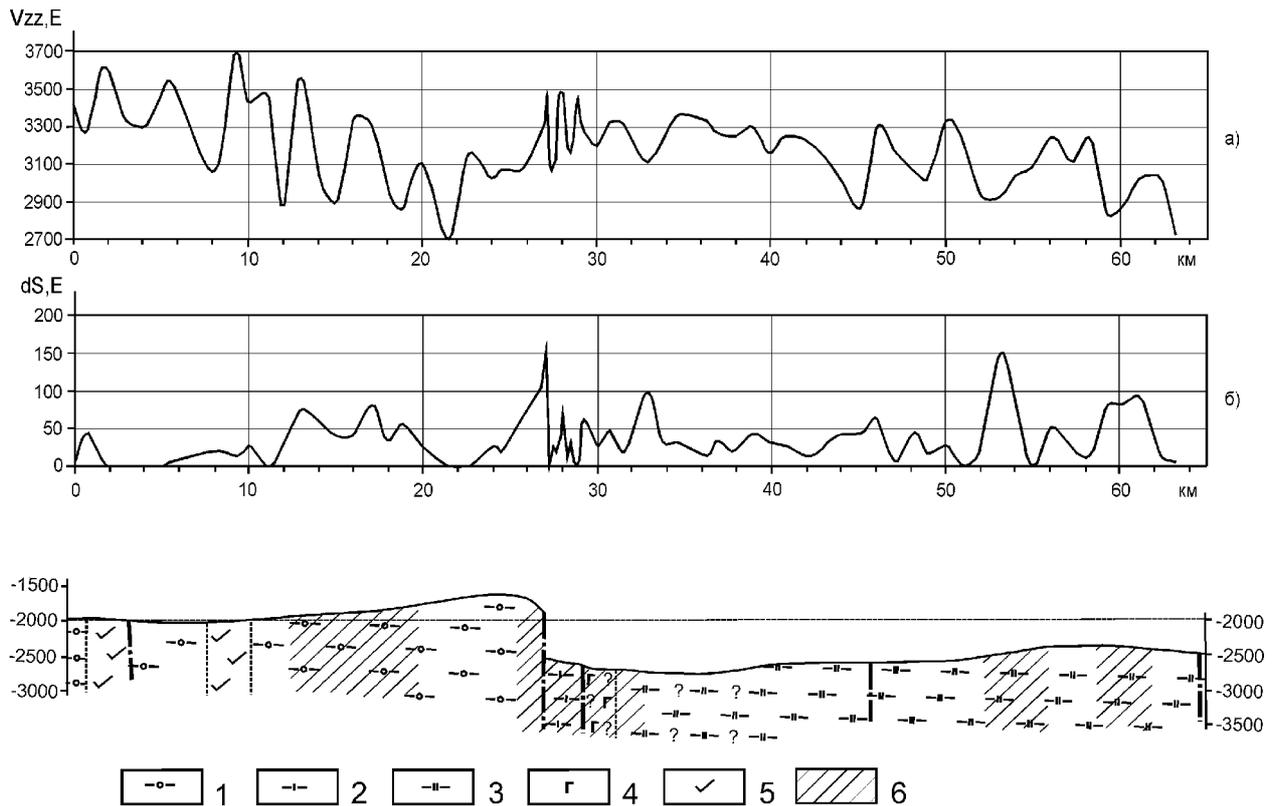


Рис.6. Геоплотностной разрез по профилю I.



**Рис. 7. Результаты интерпретации вертикального градиента и его дисперсии по профилю I: 1-3 – гнейсы различного состава; 4 – габбро; 5 – андезиты; 6 – ослабленные зоны.**

делах фиксируется на плотностном разрезе. Он является границей двух различных по плотностным характеристикам крупных блоков, разбитых на блоки более высокого порядка. В частности, севернее р. Волга выделяется фрагмент крупного блока пониженной плотности с глубиной залегания нижней кромки более 25 км.

Сопоставим распределение  $\Delta g$  и  $V_{zz}$  по профилю I, представленное на рис. 6. На кривой  $\Delta g$  сильно сглажен эффект от мелких разломов за счет разномасштабности измерений  $\Delta g$  и  $V_{zz}$  и различного физического содержания измеряемых величин. Например, в локальных максимумах  $\Delta g$  отмечаются четкие минимумы  $V_{zz}$ , которые нами связываются с предполагаемыми разломами неглубокого заложения. Обращает на себя внимание, что в региональном плане минимумы и максимумы поля силы тяжести и поля градиента сдвинуты относительно друг друга. В первую очередь это относится к неоднократно упоминавшемуся выше широтному разлому, который в поле  $V_{zz}$  также отмечается широким минимумом. Этому можно найти логичное объяснение. Глубинный разлом (точнее его зона), очевидно, имеет наклон в восточном или северо-восточном направлении. Поскольку сила тяжести является функцией массы, то ее минимум отвечает центру тяжести, смещенному по падению разлома. Вертикальный же градиент, как функция плотности, в большей степени реагирует на верхнюю приповерхностную часть зоны динамического влияния разлома. Кроме того, в верхней части разреза имеются

габброиды, которые вносят свою долю в характер поля градиента.

Результаты геологической интерпретации измерений вертикального градиента по профилю I представлены на рис. 7. Прежде всего, обращает на себя внимание снижение уровня поля градиента в сторону р. Волга. Минимум же поля градиента относительно р. Волги смещен к югу. Непосредственно над плотиной наблюдается некоторое увеличение значений  $V_{zz}$ . Это локальное повышение поля можно объяснить наличием основных пород (габброиды) в срезе фундамента. К сожалению, габбро вскрыты единственной скважиной чуть восточнее профиля I, но, судя по характеру изменений градиента и магнитного поля, область распространения основных пород имеет продолжение к западу.

Распределение значений вертикального градиента вдоль профиля II несколько отличается от распределения его вдоль профиля I. Скорее всего это связано с тем, что профиль II проходит вдоль выделенной нами по магнитному полю разломной зоны меридионального направления. Поэтому представительность и информативность данных на профиле II несколько ниже. Но, в общем, и на этом профиле наблюдается общая тенденция уменьшения значений  $V_{zz}$  к руслу Волги.

При измерении вертикального градиента силы тяжести на каждом пункте наблюдения производится не менее десяти измерений, а иногда и более. Показания гравиметра четко реагируют на геодинамическую обстановку в пункте наблюдения измене-

нием дисперсии ( $dS$ ) отклонений результатов единичных измерений градиента от среднего значения в данном пункте. В итоге над разломными зонами фиксируются повышенные значения дисперсии, что отмечалось ранее авторами статьи [7].

Проанализируем детально один из графиков дисперсии, приведенный на рис. 7. Как правило, минимальным значениям  $V_{zz}$  за счет того, что породы в зонах разломов разуплотнены соответствуют повышенные значения рассматриваемой величины. Но вместе с тем бывает и обратное соотношение, что в общем не противоречит общей тенденции. Например, в зоне разлома может находиться пластовая интрузия, которая вызовет положительную аномалию.

Отметим, что над плотиной ГЭС установлены исключительно высокие значения дисперсии, свыше 150 Этвеш. Интересно, что на южном окончании профиля II при аналогичных значениях  $V_{zz}$  также фиксируются повышенные значения  $dS$ . Оказывается, эта часть профиля совпадает с зоной повышенной сейсмичности, выделенной по данным сейсмологии (см. рис. 1). Результаты измерения вертикального градиента силы тяжести не только подтвердили существование выделенных ранее разломов, но и позволили внести существенные коррективы в данные о строении фундамента. Например, выявлена зона повышенных значений дисперсии над левым берегом р.Волги. Судя по ее характеру, зона этих разломов гораздо шире. Обращает на себя внимание зона повышенных значений  $dS$  между пикетами 11 и 20, ранее эта зона не выделялась. Значительные коррективы можно внести на участке земной коры между пикетами 50 и 62.

В заключение можно констатировать следующее. Результаты измерений вертикального градиента силы тяжести показывают, что плотина Куйбышевской ГЭС находится в сейсмически опасной зоне (зона крупного мантийного разлома), которая в настоящее время является тектонически активной. По этому разлому вполне вероятны значительные тектонические подвижки, "спусковым крючком" для

которых могут послужить сильные землетрясения в альпийском поясе, расположенном на Кавказе и в Средней Азии. Следует также отметить, что в указанную сейсмоопасную зону входит не только плотина, но и г. Жигулевск с прилегающими территориями.

Выполненные работы подтвердили эффективность гравитационной градиентометрии при решении инженерно-геологических задач, особо отметим высокую информативность дисперсионного анализа измерений градиента.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Антонов Ю.В., Сусин О.А., Слюсарев С.В. Использование микрогравиметрических измерений в инженерно-геологических изысканиях // Изв. вузов. Геол. и разведка. -1992. -№4. -С.134-14
2. Антонов Ю.В., Сусин О.А., Слюсарев С.В. Роль микрогравиметрических измерений в инженерно-геологических изысканиях // Разведка и охрана недр. -1993. -№1. -С. 28-31.
3. Антонов Ю.В., Сусин О.А., Слюсарев С.В. Использование вертикального градиента силы тяжести в разведочной и инженерной геофизике // Сб. рефератов докладов междунар. научн. конфер. "Геофизика и современный мир". - М., 1993. -С. 88
4. Антонов Ю.В., Сусин О.А., Слюсарев С.В. Микрогравиметрические изыскания на Воронежском кристаллическом массиве // Разведочная геофизика. -1993. - Вып.115. -С. 69-77.
5. Антонов Ю.В., Слюсарев С.В., Зубченко Е.А. Природа аномалий вертикального градиента силы тяжести над горными сооружениями Южного Тянь-Шаня // Изв. вузов. Геол. и разведка. -1990. -№7. -С.96-102.
6. Антонов Ю.В., Муравина О.М. Эквивалентный подбор распределения избыточных масс по аномалиям силы тяжести на криволинейной поверхности // Изв. вузов. Геол. и разведка. -1991. -№11. -С.100-106.
7. Антонов Ю.В., Жаворонкин В.И., Слюсарев С.В. Новые возможности гравиметрии в изучении геологического строения земной коры / Геофизика. -1999. -№ 3. -С.47-52.
8. Старостенко В.И. Устойчивые численные методы в задачах гравиметрии. -Киев, 1978. -227с.