

СУБГОРИЗОНТАЛЬНЫЕ ГЕОДИНАМИЧЕСКИ АКТИВНЫЕ ЗОНЫ ПЛАТФОРМЕННОЙ ТЕРРИТОРИИ — МЕТОДЫ ВЫЯВЛЕНИЯ И ОЦЕНКА

В.М. МАКЕЕВ, Е.А. КАРФИДОВА, И.В. КОРОБОВА

Институт геоэкологии им Е.М. Сергеева РАН

101000 Россия, г. Москва, Уланский пер., д.13, стр.2; e-mail: vmakeev@mail.ru; e.karfidova@yandex.ru

С целью выявления и оценки субгоризонтальных геодинамически активных зон разработан геоинформационный метод, рассматривающий степень несогласованности разновозрастных опорных поверхностей. В основе метода лежит анализ цифровых моделей рельефа и модель выявления зон азимутальных и угловых несогласий. Графики-разверстки таких зон указывают на неоднородное строение рельефа опорных поверхностей, которое является причиной развития субгоризонтальных геодинамически активных зон. Предполагается, чем больше рассогласованность разновозрастных поверхностей, тем выше вероятность развития подобных зон, опасных с точки зрения активизации геологических процессов.

Ключевые слова: геодинамически активные зоны; цифровые модели рельефа опорных горизонтов; геоинформационный метод; модель выявления зон азимутальных несогласий; послойные дислокации; экспозиция уклона; вещественно-структурная рассогласованность.

SUBHORIZONTAL GEODYNAMIC ACTIVE ZONES AT THE PLATFORMS — METHODS OF IDENTIFICATION AND EVALUATION

V.M. MAKEEV, E.A. KARFIDOVA, I.V. KOROBOVA

Sergeev Institute of Environmental Geoscience RAS (IEG RAS)

101000, Russia, Moscow Ulanskyepereulok 13, building 2; e-mail: vmakeev@mail.ru; e.karfidova@yandex.ru

Authors developed a geoinformation(GIS) method considering the degree of disagreement between the key horizons of the different ages for the detection and evaluation of the subhorizontal geodynamic active zones at the platforms. The method is based on the analysis of the digital elevation models and the model of detection of the azimuthal and angular displacements zones. The allocation graphics of these zones indicate a heterogeneous structure of the key horizons, which is the reason for the development of subhorizontal geodynamic active zones. It is assumed, the greater the disagreement between the surfaces of the different age, the higher the probability of the development of the zones which might be dangerous by causing the activation of geological processes.

Key words: geodynamic active zones; digital elevation model of key horizons; GIS-method (geoinformation method); model of detection of azimuthal displacements zones; layered dislocations; slope aspect; substantial-structural disagreement.

Понятие и принципы выделения геодинамически активных зон впервые были разработаны В.И. Макаровым в середине 90-х гг. прошлого века и развиты в работах его последователей [3—6, 8, 9]. В основе исследований лежат представления о развитии на фоне пологих изгибных неотектонических деформаций узко локализованных геодинамически активных зон субвертикального типа. Они изучены впервые, как альтернатива активным разломам, выделяемым в слабоактивных платформенных условиях. По нашему мнению, условия для образования активных разломов на древних платформах отсутствуют [3]. Геодезические (наземные и спутниковые) наблюдения, выполненные с повышенной пространственно-временной детальностью [2], являются необходимыми, но далеко не достаточными для выявления и оценки активности разломов плат-

форменных территорий, поскольку для определения неотектонической составляющей деформаций требуется длительный период геодезических наблюдений за движениями земной поверхности. Он должен на порядок, как минимум, превышать период наблюдений в горно-складчатых областях.

В нашем случае, геодинамически активные зоны — это двухмерные линейные или трехмерные изометричные объёмы геологической среды разных рангов и направленности развития, в которых в силу различных причин появляются условия для концентрации дополнительных тектонических напряжений и их разрядки. Их выявление основывается на методологии признания разнородных изгибных деформаций и их несогласном сочленении, а также комплексе методов, одним из которых является структурно-геодинамический [3, 5].

В прикладных исследованиях изучение геодинамически активных зон приобрело особую актуальность в связи с обеспечением геодинамической безопасности территорий проектируемых атомных электростанций, участков захоронения радиоактивных отходов, буферной полосы магистральных трубопроводов и других территорий, в том числе урбанизированных [5]. Инженерно-геологическое районирование территории Московского мегаполиса с учётом буровых, геофизических и других данных показало, что породы осадочного чехла на отдельных участках имеют повышенную послойную вещественно-структурную рассогласованность одни относительно других, выраженную разными углами падения пород и резким сменой вещественного состава [4, 6, 7, 8, 9]. Изучение этой рассогласованности показало, что она может являться одной из причин формирования послойных зон повышенных напряжений и деформаций — субгоризонтальных геодинамически активных зон.

Зоны рассогласования разновозрастных деформаций осадочного чехла

Вещественно-структурная рассогласованность возникает в результате тектоно-магматических циклов: каледонских, герцинских и т. д. Каждый новый цикл формирует свой и присущий только ему структурный план, который исследуется при анализе рельефа опорных поверхностей. Поверхности, сложенные разными по составу породами и по-разному деформированные, в определённой композиции неотектонических сил и напряжений могут привести к условиям образования послойных зон повышенных современных напряжений.

Предполагается, что степень рассогласованности разновозрастных деформаций определяет их дифференциацию по напряжённому и деформированному состоянию: чем больше разница между азимутами простираения разновозрастных деформаций, включая углы падения, тем выше тектоническая напряжённость в осадочном чехле. Рассогласованность по элементам залегания пород и вещественному составу является необходимым условием для появления дополнительных напряжений, поскольку дисгармоничные по вещественно-структурному плану слои по-разному реагируют на неотектонические напряжения. Это явление выражается в формировании субгоризонтальных геодинамически активных зон.

Выявление этих зон основывается на выборе двух ключевых поверхностей осадочного чехла, которые отвечали бы требованиям опорных: они должны быть однородными по вещественному составу, максимально развитыми на площади исследования и их кровли не преобразованы эрозийными

процессами. Одна из поверхностей может отвечать неотектоническому (позднекайнозойскому) этапу, другая — допозднекайнозойскому, т. е. мезозойскому или палеозойскому этапу. В 2007—2009 гг. во время выполнения уникального проекта крупномасштабного инженерно-геологического картографирования территории Москвы были построены цифровые модели рельефа многих опорных поверхностей с использованием базы данных по скважинам [1, 8]. Эти модели рельефа легли в основу разработки геоинформационных технологий, позволяющих оценить степень соответствия разновозрастных деформаций и выявить субгоризонтальные геодинамически активные зоны. Результаты исследований впервые были доложены в Минске на Университетских геологических чтениях [6] и широко представлены на конгрессе Международной ассоциации инженеров-геологов (МАИГ-2014) [9].

Методы выявления субгоризонтальных геодинамически активных зон

Выявление зон послойного рассогласования разновозрастных деформаций осадочного чехла, или субгоризонтальных геодинамически активных зон, основывается на последовательном решении следующих задач:

1. Выбор двух опорных поверхностей осадочного чехла, максимально полно развитых на площади исследования. Ими могут быть любые по возрасту погребённые поверхности осадочного чехла.

2. Построение регулярных интерполяционных сеток (ГРИД/GRID) по разновозрастным поверхностям на основе базы данных скважин и создание цифровых моделей рельефа (ЦМР) опорных поверхностей.

3. Сопоставление цифровых моделей рельефа двух опорных поверхностей с целью выявления зон азимутальных несогласий по разнице простираения этих поверхностей.

Геоинформационный метод, направленный на выявление (детекцию) зон азимутальных несогласий разновозрастных поверхностей, включает модуль строителя моделей Model Builder ESRI (рис. 1).

Основными параметрами модели являются: 1) размер ячейки ГРИД, 2) интервал высот опорных поверхностей, 3) расстояние между точками на изолинии, в которые экспортируются значения экспозиции и уклона. Эти параметры определяются в зависимости от поставленной задачи и масштаба карты.

Углы азимутальных несогласий двух разновозрастных опорных поверхностей предлагается классифицировать на пять классов (табл. 1, рис. 2.).

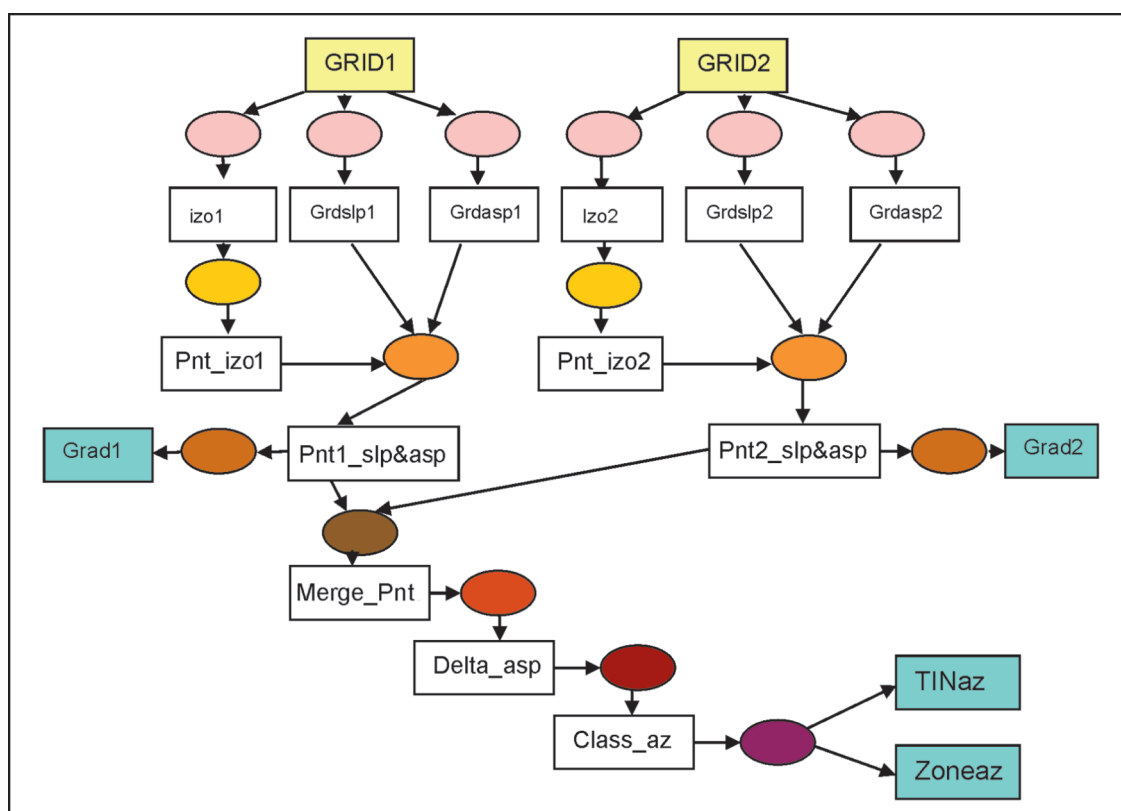


Рис. 1. Модель выявления зон азимутальных и угловых несогласий двух разновозрастных поверхностей: GRID1 и GRID2 — цифровые модели рельефа первой и второй опорных поверхностей в виде регулярных интерполяционных сеток (ГРИД/GRID); izo1 и izo2 — расчётные изолинии рельефа поверхностей; Grdslp1 и Grdslp2 — расчётные ГРИД по уклонам (углу падения) поверхностей; Grdasp1 и Grdasp2 — ГРИД по экспозиции уклона поверхностей (азимутальное направление уклона); Pnt_izo1 и Pnt_izo2 — точечный слой с атрибутами по двум поверхностям: уклон 1 и экспозиция 1, уклон 2 и экспозиция 2; Grad1 и Grad2 — градиенты азимута падения поверхности в точке (векторы, имеющие азимутальное направление и длину, показаны в соответствии с величиной уклона или угла падения); Merge_pnt — множество объединённых точек двух поверхностей; Delta_asp — разница экспозиций двух поверхностей (азимутальных направлений уклонов); Class_az — классификация азимутальных несогласий на 5 классов; TIN_az — поверхность триангуляционной нерегулярной сети (TIN); Zone_az — зоны, ограниченные изолиниями TIN, азимутальных несогласий 3-го класса и более высокого

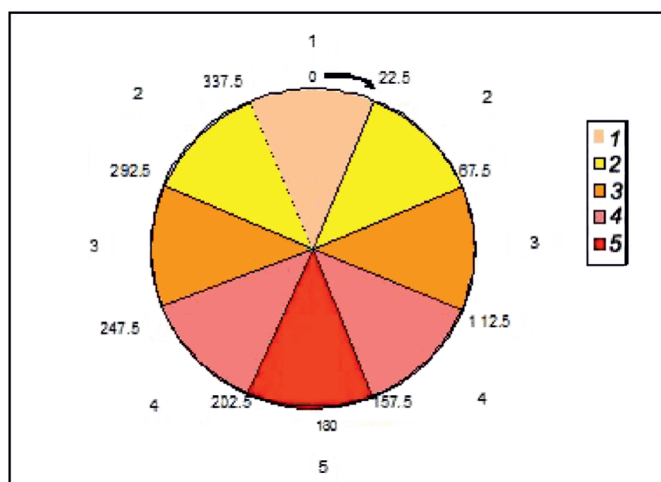


Рис. 2. Классификация зон азимутальных несогласий на пять классов; 1—5 — сектора несогласованности двух опорных разновозрастных поверхностей; азимут простираний изолиний высот поверхностей находится в интервалах: первый класс от 337,5 до 22,5°; второй класс — от 22,5 до 67,5°; третий класс — от 67,5 до 112,5°; четвертый класс — от 112,5 до 157,5°; пятый класс — от 157,5 до 202,5°

Таблица 1

Классы несогласий разновозрастных поверхностей

Класс несогласий	Углы рассогласования азимутов, градусы
1	337,5 < < 22,5 (бежевый сектор)
2	22,5 < < 67,5 или 292,5 < < 337,5 (желтый сектор)
3	67,5 < < 112,5 или 247,5 < < 292,5 (оранжевый сектор)
4	112,5 < < 157,5 или 202,5 < < 247,5 (розовый сектор)
5	157,5 < < 202,5 (красный сектор)

Субгоризонтальные геодинамически активные зоны на территории Москвы

Для территории восточной части Москвы на основе вышерассмотренного геоинформационного метода построена карта азимутальных несогласий

поверхностей верейских отложений среднекаменноугольного возраста и келловей-оксфордских отложений средне-позднеюрского возраста (рис. 3).

Карта азимутальных несогласий поверхностей разновозрастных горизонтов, представленная на рис. 3, имеет оригинальный масштаб 1: 10 000. На карте интервал сечения высот изолиний выбран через 5 м, размер ячейки ГРИД цифровой модели рельефа составляет 100 м, расстояние между точками на изолинии — 500 м.

Геоинформационный метод выявления зон азимутальных несогласий двух разновозрастных поверхностей основывается на применении ядра ГИС-системы Arc View и соответствующих модулей и расширений, доступных пользователям программного обеспечения ESRI [9] (табл. 2).

Углы падения опорных поверхностей нормализованы и приведены в сопоставимый вид, исходя из масштаба карты. Величина угла падения поверхности в точке пропорциональна длине стрелки. Расчёт интерполяционной TIN поверхности обуславливает переход от целых значений класса к действительным. При разделении на классы несогласий рекомендуется использовать метод «естественных границ», когда дисперсия внутри класса значительно меньше дисперсии между классами.

Первый и второй классы по степени азимутальных несогласий являются незначительными. Третий класс отвечает углу азимутальных несогласий, когда изолинии рельефа пересекаются под углом 90°. Четвертый и пятый классы характеризуются градиентами уклонов, направленными в противоположные стороны. Они локализируются вместе на юге исследуемой территории. На рис. 2 красным сектором показаны зоны несогласий разновозрастных поверхностей: *A* (3-й класс) и *B* (4-5-й классы). Они рассматриваются в качестве субгоризонтальных геодинамически активных.

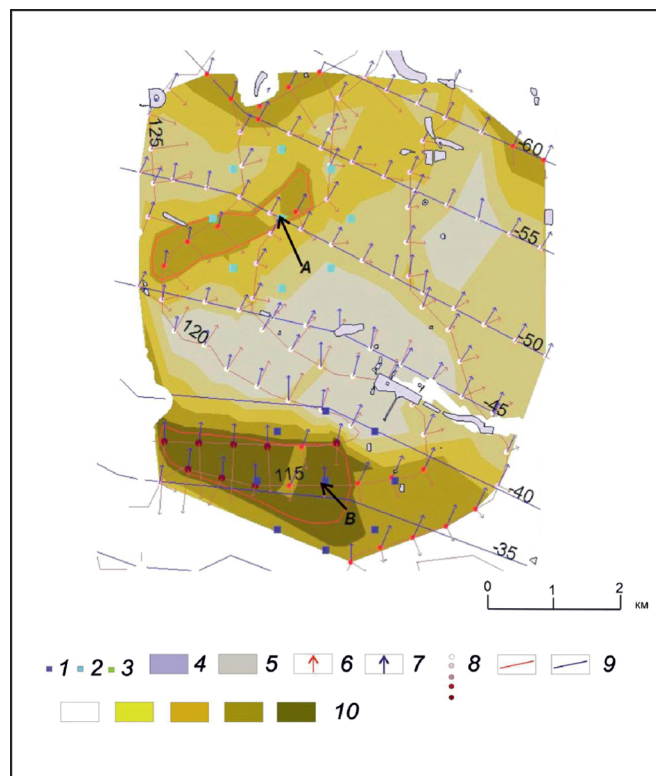


Рис. 3. Карта азимутальных и угловых несогласий поверхностей верейских и келловей-оксфордских отложений: 1 — точки окружности *B*, расположенные в пределах 4- и 5-го классов азимутальных несогласий; 2 — точки окружности *A*, расположенные в пределах 3-го класса азимутальных несогласий; 3 — точки на изолиниях рельефа с градиентами уклонов, 4 — гидрография, 5 — эрозионное «окно» келловей-оксфордских отложений; градиенты уклона поверхностей: 6 — верейских отложений, 7 — келловей-оксфордских отложений, 8 — вершины триангуляционной нерегулярной сети (TIN), представленные пятью классами азимутальных несогласий различной интенсивности; изолинии поверхностей: 9 — келловей-оксфордских отложений (*a*) (абс. высота поверхности от 115 до 125 м) и верейских отложений (*b*) (абс. высота поверхности от — 60 до — 35 м), 10 — поверхность триангуляционной нерегулярной сети (TIN), классифицированная на пять классов: первый (*a*) 1–1,8; второй (*b*) 1,8–2; третий (*в*) 2,6–3,4; четвертый (*г*) 3,4–4,2 и пятый (*д*) 4,2–5

Таблица 2

Основные модули и расширения геоинформационного метода

Номер шага	Код шага	Наименование процесса	Наименование модуля*	Входные данные	Расчетные данные	Параметры
1	1.1	Расчёт изолиний	Spatial Analyst	ЦМР (GRID)	Изолинии	Шаг по высоте изолинии
	1.2	Расчёт уклонов	Spatial Analyst	ЦМР (GRID)	GRID уклонов	
	1.3	Расчёт экспозиции	Spatial Analyst	ЦМР (GRID)	GRID экспозиции	
2	2	Конвертация изолинии в множество равноудаленных точек на изолинии	poly2pts.avx	Изолинии	Точечный слой	1. Определение начальной точки 2. Расстояние между точками
3	3	Экспорт GRID уклонов и GRID экспозиции в точечный слой	extractdata.avx	GRID уклонов GRID экспозиции	Атрибуты точечного слоя	
4	4	Построение градиентов, как векторов	flowvect.avx	Точечный слой	Градиенты-вектора	
5	5	Построение TIN	3D Analyst	Точечный слой	Поверхность TIN	

Примечание. *Названия модулей приводятся по первоисточникам, прошедшим успешную апробацию.

Строение субгоризонтальных геодинамически активных зон *A* и *B*, в основе которых лежит азимутальная рассогласованность разновозрастных деформаций, наглядно иллюстрируется на графике-разверстке (рис. 4).

График-развёрстка строится следующим образом:

1. На опорных поверхностях строятся окружности определённого радиуса R (м). Их центр должен находиться в центре геодинамически активных зон *A* и *B*.

2. Окружности делятся на 8 (16) равных сегментов. На них определяются соответственно 8 (16) точек, соответствующих азимутам: 45° , 90° , 180° и т. д. по часовой стрелке.

3. Экспорт высот центра окружности (Z_c) и точек на окружности (Z_i , $i = 1 - 8$) с вычислением разницы абсолютных высот Z_i , где: $Z_0 = 0$, $Z_i = Z_c - Z_i$ для каждой окружности двух опорных поверхностей.

4. Построение графика-развёрстки двух окружностей для каждой опорной поверхности. По оси X откладывается азимут точки на окружности (градусы), по оси Y — разница высот Z_i (м).

Геодинамически активные зоны *A* и *B* в различных секторах окружности радиусом $R = 1000$ м характеризуются неоднородным строением по простиранию и углу падения опорных поверхностей (разновозрастных деформаций). На графике-разверстке кривые разницы высот поверхностей верейских и келловей-оксфордских отложений имеют «волнообразное» строение, часто не согласующееся между собой. В результате кривые пересекаются одна с другой или расходятся в области отрицательных и положительных значений.

В зоне *A* несогласованность разницы высот проявлена пересечением двух разновозрастных кривых. Точки пересечения указывают на пространственное совпадение разницы высотных значений, т.е. амплитуд. Пересечение кривых отмечает-

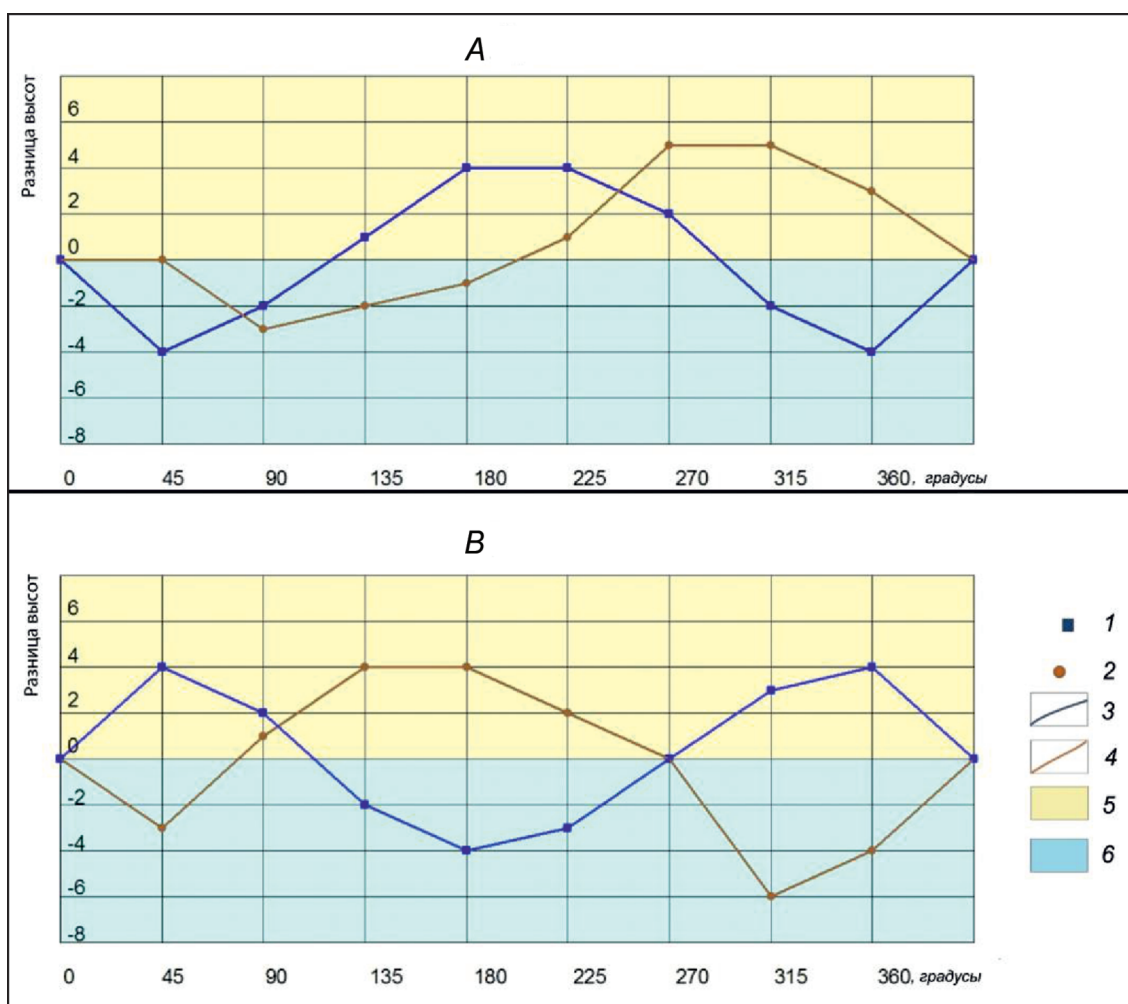


Рис. 4. График-разверстка анализа строения и простирания субгоризонтальных геодинамически активных зон *A* и *B*; точки разницы высот между центром окружности и точкой на окружности по поверхностям: 1 — верейских, 2 — келловей-оксфордских отложений; кривые по поверхностям: 3 — верейских, 4 — келловей-оксфордских отложений; области значений: 5 — положительных, 6 — отрицательных

ся в двух секторах: 1) $45 - 90^\circ$ и 2) $225 - 270^\circ$, отвечающих субширотному восток—северо-восток—запад—юго-западному простиранию. Первый сектор пересечения кривых находится в области отрицательных амплитуд разницы высотных значений, второй сектор — в области положительных амплитуд. В них суммарная амплитуда высотных значений поверхностей не превышает 4 м.

В зоне *В* устанавливаются два типа несогласованности поверхностей: 1) один выражен минимальными амплитудами разницы высот и пересечением кривых, 2) другой — максимальными амплитудами кривых, достигающими 8 м. Точки пересечения кривых отвечают азимутам $90-100^\circ$ и 270° , показывающим одинаковое широтное простирание поверхностей при отличном тренде изменения разницы высот. Кривые максимального расхождения разницы высот находятся в секторах $135-180^\circ$ и $315-360^\circ$, отвечающих одинаковому диагональному (юг—юго-восточному — север—северо-западному) простиранию поверхностей.

Таким образом, в широтной, субширотной и диагональной зонах проявлена послойная рассогласованность разновозрастных деформаций. Диагональная зона может рассматриваться как дискордантная, поскольку поверхности деформированы с разными знаками вертикального движения. Зоны рассогласованности разновозрастных деформаций — это потенциальные зоны концентрации повышенных современных напряжений и деформаций, которые являются опасными с точки зрения активизации интенсивных геологических процессов.

Согласно структурно-геоморфологической карте г. Москвы [4, 9], геодинамически активная зона *А* располагается в пределах границы запад—юго-западного простирания, разделяющей поднятие и относительно выраженное опускание (рис. 5). Таким образом, две принципиально разных структуры — субвертикальная граница (блокораздел) и субгоризонтальная зона — пространственно совпадают одна с другой. Геодинамически активная зона *В* находится в пределах низины с устойчивой и длительно развивающейся тенденцией относительных опусканий. Низина пересекается границами разнопорядковых блоков, которые косо простираются относительно геодинамически активной зоны *В*. В.И. Макаров и В.И. Бабак эти опускания рассматривали в качестве зон относительно пониженной комфортности проживания населения.

Заключение

Таким образом, предлагаемые геоинформационные методы позволяют выявлять, оценивать и

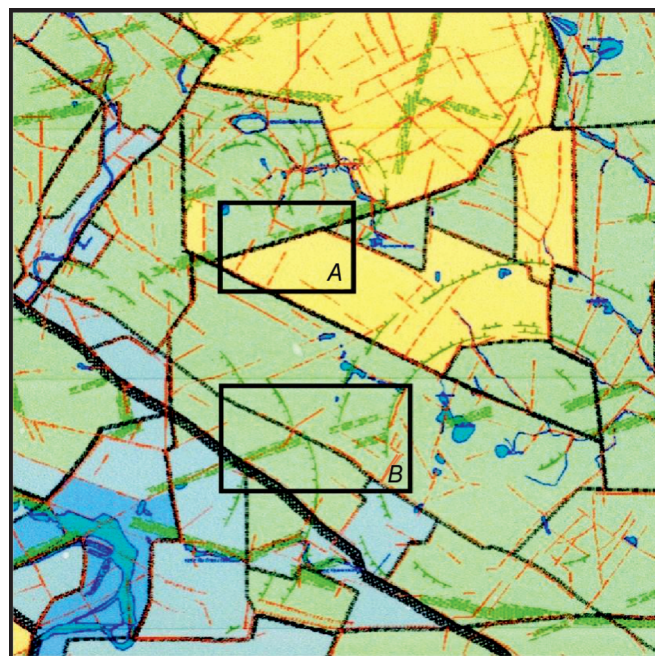


Рис. 5. Фрагмент структурно-геоморфологической карты г. Москвы [3]; цветом показаны различные структурные формы: желтым — возвышенности с тенденцией к поднятию, зеленым и синим — низины с устойчивой тенденцией к опусканию; спрямленные черные линии разной толщины и типа — блокоразделы разного порядка; линии разного цвета и типа — линейменты; прямоугольниками показаны участки детальных исследований, отвечающие соответственно геодинамически активным зонам *А* и *В*

анализировать субгоризонтальные зоны рассогласования разновозрастных деформаций. Эти зоны рассматриваются нами в качестве новой категории структур — субгоризонтальных геодинамически активных зон, имеющих трехмерную конфигурацию. Их происхождение связывается с фундаментальным свойством литосферы — с тектонической, вещественной и реологической расслоенностью. С субгоризонтальными геодинамически активными зонами отождествляется проявление интенсивных геологических процессов, в том числе повышенной платформенной сейсмичности. При геофизических исследованиях методом общей глубинной точки (ОГТ) выделяются подобного типа послойные дислокации, которые классифицируются в качестве «волноводов». Согласно буровым данным, волноводы характеризуются аномально высокой трещиноватостью и газофлюидной проводимостью.

Выявление субгоризонтальных геодинамически активных зон актуально с точки зрения решения прикладных задач, направленных на оценку геодинамической надёжности (пригодности) территорий проектирования разных по сложности инженерных сооружений: атомных станций, гидроэлектростанций, захоронения радиоактивных отходов и т. п.

ЛИТЕРАТУРА

1. Карфидова Е.А., Сизов А.П. Оценка изученности условий городской территории для инженерно-геологического картографирования // Использование и охрана природных ресурсов М: НИИ-ПРИРОДА. № 1. 2008. С. 65-72.
2. Кузьмин Ю.О. Современная геодинамика разломных зон: разломообразование в реальном масштабе времени // Геодинамика и тектонофизика. 2014. Том 5, №2. С. 401-443 (<http://dx.doi.org/10.5800/GT-2014-5-2-0135>).
3. Макаров В.И., Дорожко А.Л., Макарова Н.В., Макеев В.М. Геодинамически активные зоны платформ // Геозкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2007. № 2. С. 99-110.
4. Макаров В.И., Григорьева С.В., Макеев В.М., Коробова И.В., Крылова В.С. Структурно-геодинамическая карта г. Москвы масштаба 1:25 000 // Малый энциклопедический атлас г. Москвы. М., 2013.
5. Макеев В.М., Макарова Н.В., Леденев В.Н., Дорожко А.Л., Суханова Н.В., Карфидова Е.А., Коробова И.В. Основы концепции геодинамической безопасности территорий экологически опасных сооружений // Геозкология. 2014. № 2. С. 99-110.
6. Макеев В.М., Карфидова Е.А., Микляев П.С., Авхимович А.Н., Дорожко А.Л., Коробова И.В. Метод изучения послойных структурных несогласий при геодинамических исследованиях // Материалы VII Университетских геологических чтений: проблемы региональной геологии и поисков полезных ископаемых. Минск: Издательский центр БГУ, 2013. С. 20-22
7. Миронов О.К. Геоинформационные технологии для составления крупномасштабных геологических карт территории Москвы // Геозкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология 2011. №3. С. 200-216
8. Makarov V.I., Grigorieva S.V., Makeev V.M. Structural and geodynamic researches in engineering geology surveys and environment study. Environmental Geosciences and Engineering Survey for Territory Protection and Population Safety. International Conference EngGeoPro-2011. Moscow. Abstracts Proceeding. Moscow, 2011.
9. Makeev V.M., Karfidova E.A., Dorozhko A.L. Structural-geodynamic Mapping Including The Geostatistical Analysis Methods Of The Platform Areas On The Example of Moscow Megalopolis // Springer, IAEG XII Congress, Torino-2014, Italy.
10. Open soft ware of ESRI's users: <http://arcsripts.esri.com> — дата обращения 01.12.2015.