

М.М. Довбнич, С.Н. Демянец

ГЕОДИНАМИЧЕСКАЯ И ГЕОТЕКТОНИЧЕСКАЯ ПОЗИЦИЯ ПОЛЕЙ ГЕОИЗОСТАТИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ СЕЙСМОАКТИВНЫХ СЕГМЕНТОВ УКРАИНЫ

Розглянуто методику та результати оцінювання напружень у тектоносфері, зумовлених порушеннями геоізоастазії для Кримського та Карпатського регіонів. На основі аналізу геоізоастатичних полів напружень розглянуто можливі моделі формування та геологічного розвитку регіонів. Обговорюється можливість використання полів напружень геоізоастатичної природи як додаткового критерію при геотектонічних побудовах та сейсмотектонічному районуванні.

Рассмотрены методика и результаты оценки напряжений в тектоносфере, обусловленных нарушением геоизостазии для территории Крымского и Карпатского регионов. На основе анализа геоизостатических полей напряжений рассматриваются возможные модели формирования и геологического развития регионов. Обсуждается возможность использования полей напряжений геоизостатической природы как дополнительного критерия при геотектонических построениях и сейсмотектоническом районировании.

The method and estimation results of tectonosphere stresses caused by geostasy disturbances of Crimea and Carpathian region territory are considered. The possible models of forming and geological development based on the analysis of geostatic stress fields are examined. The opportunities of geostatic stress fields' usage as an additional criterion in geotectonic buildings and seismic-hazard zoning are discussed.

Изучение напряженно-деформированного состояния является одним из ключевых звеньев в цепочке исследования природы и прогноза сейсмических событий. На протяжении последних лет авторами статьи выполнялись исследования нарушения равновесного состояния вращающейся Земли и связанных с ними полей напряжений в тектоносфере, в частности анализировались эффекты, обусловленные отклонением фактической фигуры Земли – геоида от теоретической фигуры равновесия – эллипсоида. Данные исследования базируются на явлении *геоизостазии*. Модель равновесного состояния вращающейся Земли, предложенная К.Ф. Тяпкиным и названная *геоизостазией*, хорошо освещена в геологической и геофизической литературе [1, 2]. Физико-математической основой данной концепции является принцип минимизации энергии, в соответствии с которым *любая природная динамическая система стремится к достижению минимума своей внутренней энергии*. Данный принцип неоднократно использовался исследователями [3-5] для объяснения внутренней структуры Земли, ее эволюции и протекания геологических процессов.

Применительно к системе вращающейся Земли можно воспользоваться представлениями В.В. Кузнецова. Принцип минимизации гравитационной энергии планеты и его роль в процессах, происходящих на поверхности планеты, заключается в том, что площадь фазовой поверхности стремится быть минимальной. В нашем случае фазовой поверхностью является поверхность геоида. Выполнение данного принципа приводит к минимизации площади физической поверхности планеты. Если учесть вращение, то равновесной формой будет эллипсоид вращения. Земля достигнет гидростатического рав-

новесия в тот момент, когда отклонение геоида от эллипсоида в целом по Земле окажется равным нулю. Следовательно, Земля, эволюционируя, стремится минимизировать высоту аномалии геоида. Иначе, Земля стремится достичь гидростатического равновесия, при котором её равновесная форма примет форму эллипсоида, с величиной сжатия около 1/298.

На сегодняшний день можно считать окончательно установленным, что Земля находится в состоянии, близком к состоянию гидростатического равновесия вращающейся неоднородной по радиусу жидкости. При этом в качестве критерия уравниваемости Земли могут служить как отклонения геоида от эллипсоида, обусловленные неоднородностями тектонической природы внутри планеты, так и деформации фигуры планеты под действием вариаций скорости вращения, изменения положения оси вращения в теле Земли, лунно-солнечных приливов и пр. Поскольку существуют отклонения геоида от эллипсоида, то должны существовать и силы, стремящиеся выровнять эти неоднородности, привести их в соответствие с фигурой равновесия. Как следствие, в тектоносфере планеты будут возникать и напряжения. Очевидно, что закон распределения напряжений будет определяться функцией отклонения геоида от соответствующего ему эллипсоида. Принятая в качестве меры отклонения геоида от состояния равновесия величина удобна тем, что может быть вычислена по результатам изучения гравитационного поля Земли на основе спутниковых и наземных данных. Имея данные о величине нарушения геоизостазии в пространстве и времени, можно оценить величины напряжений в тектоносфере, связанные с этими нарушениями. Данные напряжения являются индикатором того силового поля, действие которого повлекло

за собой возникновение плотностных неоднородностей в земной коре и мантии, проявляющихся в виде нарушений геоизостазии. Принимая во внимание, что тектоносфера имеет сложное разломно-блоковое строение, становится очевидным, что в процессе тектонических подвижек блоков, имеющих градиент нарастания плотности с глубиной $grad_z \sigma$, происходит возникновение вертикальных плотностных границ со значением эффективной плотности $\Delta \sigma$, определяе-

мой соотношением $\Delta \sigma = \Delta H grad_z \sigma$ (рис. 1). Другими словами, относительные вертикальные перемещения блоков тектоносферы приводят к возникновению латеральных неоднородностей, отражающихся в аномалиях геоида относительно земного референц-эллипсоида, а в тектоносфере возникнут напряжения, являющиеся следствием сил, стремящиеся выровнять эти нарушения равновесного состояния вращающейся Земли.

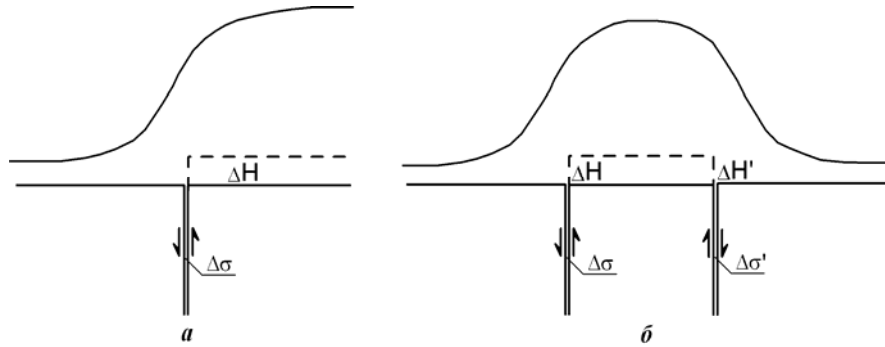


Рис. 1. Схема возникновения плотностных неоднородностей в тектоносфере Земли

В ранее опубликованной работе [6] рассмотрены физические основы и алгоритм расчета полей напряжений тектоносферы, обусловленных нарушением геоизостазии. Выполненный анализ полей напряжений, рассчитанных на основе цифровой модели аномалий геоида, полученных в результате спутниковых наблюдений (проект GRACE) и сопоставление результатов расчетов с сейсмическими событиями, а также установленные при этом закономерности, послужили толчком к проведению более детальных исследований. В частности, при построении моделей сейсмогенерирующих структур сейсмически активных сегментов Украины.

Большая часть территории Украины расположена в пределах Восточно-Европейской платформы, при этом наиболее сейсмически активными являются молодые тектонические структуры ее южного и юго-западного обрамления (рис. 2). В первую очередь это зона сочленения Восточных и Южных Карпат (**зона Вранча**), сейсмические события в которой, происходящие на глубине более 100 км, вызывают сотрясения на огромной территории не только Украины, а и всей Восточной Европы; и **Крымский сейсмоактивный сегмент**. Сейсмически активными являются также регион Добружди, Украинских Карпат, северо-западного шельфа Черного моря. Землетрясения с небольшой магнитудой отмечаются даже в пределах Украинского кристаллического щита. В настоящей работе более детально остановимся на особенностях геодинамики двух наиболее сейсмически опасных областей – зоны Вранча и Крымского сегмента.

На сегодняшний день наиболее “популярными” моделями развития сейсмических процессов в данных областях являются модели, с позиции которых сейсмичность Крымского сегмента рассматривается как результат субдукции Черноморской плиты (рис. 3, а), а в случае зоны Вранча

землетрясения на больших глубинах рассматриваются как результат погружения слэба, возникшего в ходе субдукции юго-западной части Восточно-Европейской платформы в геологическом прошлом (рис. 3, б).

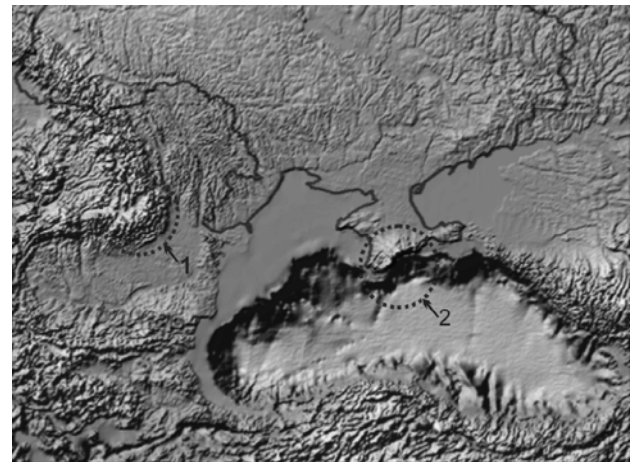


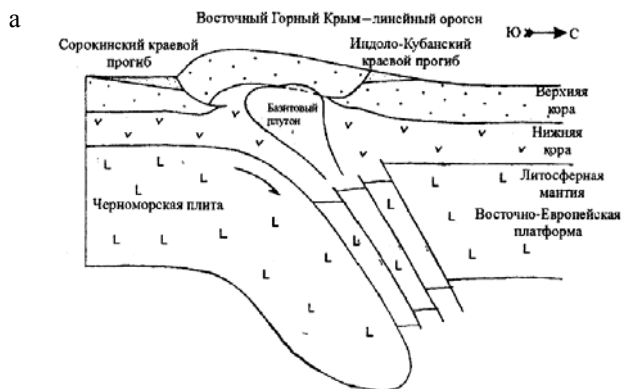
Рис. 2. Геотектоническое обрамление юга Украины: 1 – зона Вранча; 2 – Крымский сейсмоактивный сегмент

Необходимо отметить, что использование механизма субдукции для объяснения сейсмотектоники данных регионов вызывает большое количество противоречий как геологического, так и физического характера. **Действительно ли механизм субдукции в данных регионах является моделью развития сейсмических процессов, наилучшим образом удовлетворяющей всей совокупности геолого-геофизических данных?**

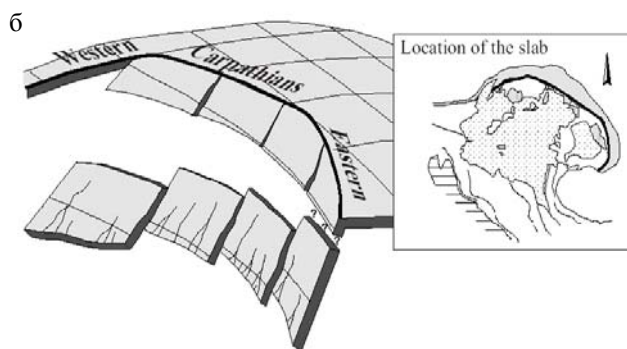
Авторам работы представляется, что дополнительную информацию о тектонике и

геодинамике рассматриваемых областей может дать анализ нарушений геоизостазии и связанных с ними

полей напряжений в рамках *блоковой модели тектоносферы*.



(Паталаха Е.И., Гончар В.В., Трегубенко В.И., 2003)



(B. Sperner, 1996)

Рис. 3. Плитотектонические модели Крымского (а) и Карпатского (б) сегментов

Цель настоящей работы – тектонический и геодинамический анализ полей напряжений, обусловленных нарушением геоизостазии, и выбор модели формирования и развития зоны Вранча и Крымского сегмента, наилучшим образом удовлетворяющей расчетным полям напряжений.

В настоящее время изучение орбит искусственных спутников Земли значительно расширило наши знания об аномалиях геоида. Имеющаяся в свободном доступе база данных аномалий геоида (проект GRACE) послужила основой для выполнения настоящей работы.

Для территории Украины был выполнен расчет полей напряжений. С целью определения позиции расчетных полей напряжений в тектонике и геодинамике исследуемого региона, а также влияния разноглубинных процессов на нарушение геоизостазии, было реализовано разделение полей напряжений на локальную и региональную составляющие. Разделение осуществлялось на основе осреднения в скользящем квадратном окне. Размеры окна определялись на основе анализа автокорреляционной функции аномалий геоида территории исследований. Согласно нашим представлениям, локальная составляющая полей напряжений отражает тектонические и геодинамические процессы, протекающие в верхней части тектоносферы – земной коре; в региональной составляющей находят отражение более глубинные процессы, протекающие в мантии. Краткий анализ полей напряжений показывает хорошее соответствие локальной составляющей напряжений основным тектоническим элементам исследуемого региона. Как отмечалось ранее, любые тектонические процессы, независимо от их масштаба приводят к перераспределению гравитирующих масс в тектоносфере, в результате чего происходит нарушение геоизостазии как на локальном, так и на региональном уровне. Особенно ярко в полях напряжений проявляются «молодые» тектонические структуры, для которых характерна высокая современная тектоническая активность и, как следствие, значительные нарушения

геоизостазии. Региональное поле напряжений, по всей видимости, отражает неоднородности верхней мантии. Сопоставление аномалий геоида и рассчитанного на их основе поля напряжений с данными сейсмотомографических исследований [7] подтверждают сделанное предположение.

Для зоны Вранча и Крыма было выполнено сопоставление эпицентров землетрясений с полями напряжений геоизостатической природы (рис. 4). Из схем видно, что большинство землетрясений приурочено к максимумам касательных напряжений. Как отмечалось выше, нарушения равновесного состояния происходят, главным образом, в случае если имеют место вертикальные перемещения блоков тектоносферы. Касательные напряжения при этом локализуют границы блоков, для которых имеют место относительные вертикальные перемещения. Как следствие, можно утверждать, что *в целом сейсмичность данных регионов определяется относительным перемещением блоков тектоносферы со значительной вертикальной компонентой*. В подтверждение этого говорит и тот факт, что в случае Северо-Анатолийского разлома, представляющего собой практически чистый сдвиг и являющегося одной из основных сейсмогенных структур Турции, не отмечается взаимосвязи между эпицентрами землетрясений и касательными геоизостатическими напряжениями. Можно лишь отметить корреляцию эпицентров землетрясений с цепочкой зон сжатия вдоль разлома.

Несмотря на увеличивающуюся точность спутниковых измерений аномалий геоида их использование в ближайшем будущем возможно лишь на уровне региональной геодинамики. В настоящей работе более детальные построения выполнялись на основе результатов гравиметрической съемки масштаба 1:200000.

На первом этапе было выполнено трансформирование аномалий гравитационного поля в редукции Буге на основе частотной селекции.

Данная трансформанта, предложенная автором [8], позволяет выполнить локализацию аномалиеобразующих объектов в плане и по разрезу. Построение сечений результатов трансформирования гравитационного поля вдоль профилей, пересекающих зону Вранча и Крымский сегмент в направлении СЗ-ЮВ, и их сопоставление с очагами землетрясений (рис. 5) позволяют утверждать следующее. В обоих случаях сейсмические события приурочены к границам блоков, которым соответствуют плотностные границы, природа которых описана выше. Именно эти границы и находят отражение на рассматриваемых разрезах. В

то же время имеют место и принципиальные отличия, а именно: 1) для Крымского сегмента аномалии Фая, Буге и рельеф качественно идентичны, в то время как для зоны Вранча вид аномалии Буге принципиально отличается от схожих между собой аномалий Фая и рельефа; 2) глубины проникновения в тектоносферу вертикальных плотностных границ принципиально отличаются и хорошо согласуются с наблюдаемой сейсмичностью. По мнению авторов, данные факты являются убедительным доказательством отличия в формировании и развитии этих двух сейсмогенных зон.

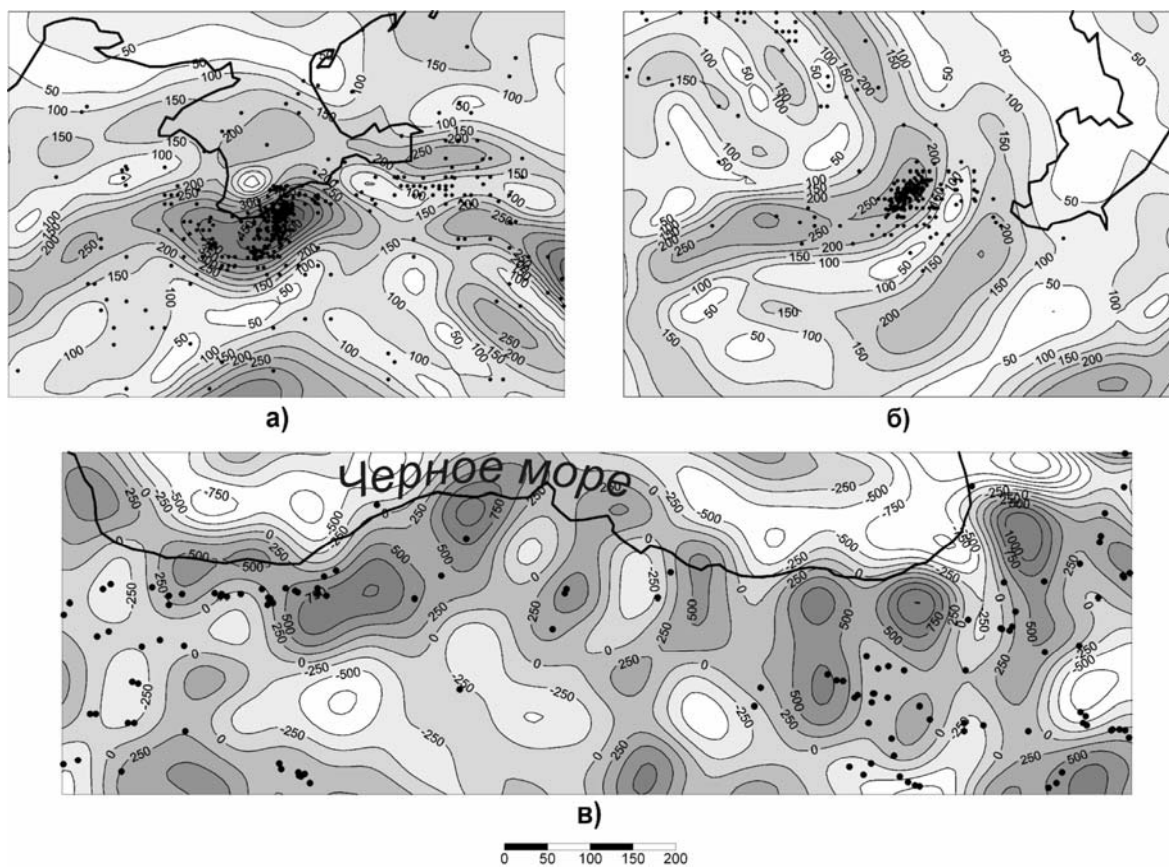
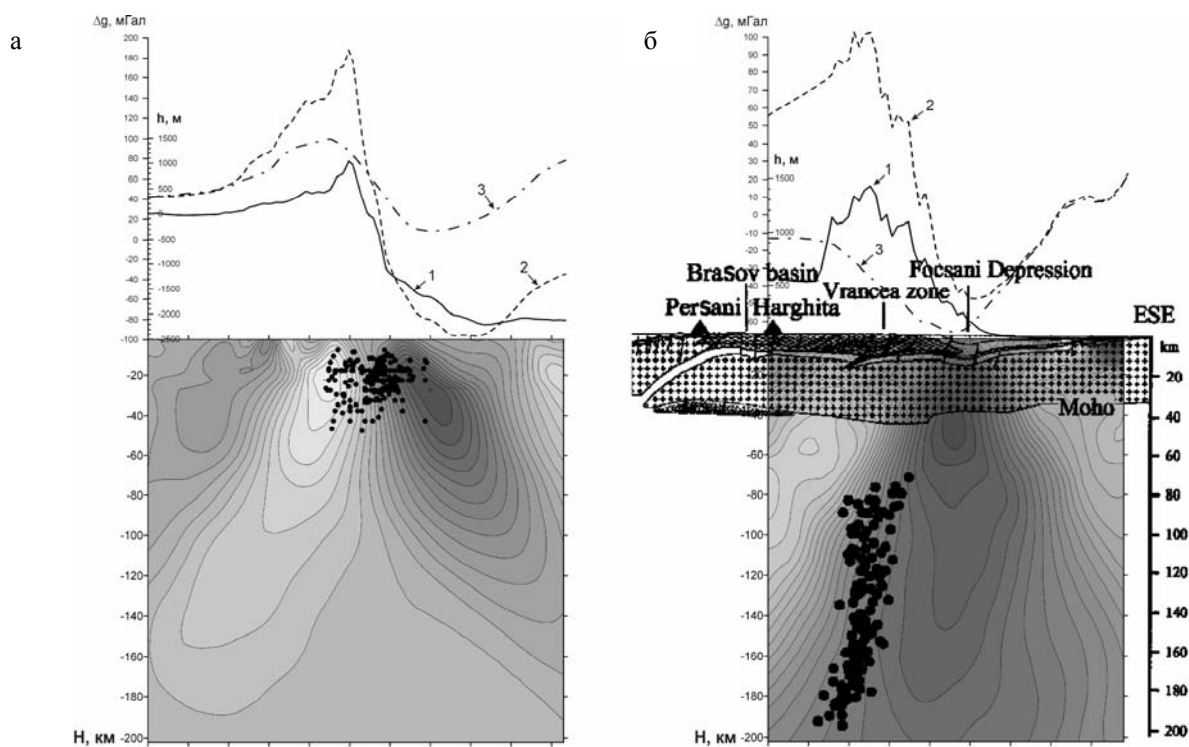


Рис. 4. Схемы сопоставления эпицентров землетрясений с локальными геоизостатическими напряжениями, кПа (по спутниковым данным): а – максимальные касательные напряжения Крыма; б – максимальные касательные напряжения Карпат (зона Вранча); в – сумма нормальных напряжений вдоль Северо-Анатолийского разлома

В работе [9] на основе комплексного анализа полей геоизостатических напряжений и геолого-геофизических данных, показано, что Черноморская впадина является "наложенной" структурой, возникшей в результате опускания блоков тектоносферы под действием изометричной аномалии растягивающих напряжений в мантии. Крымский сейсмогенный сегмент является фрагментом северной границы Черноморской впадины, вдоль которой происходит опускание ее блоков. В этом случае действительно аномалии Фая, Буге и рельеф будут качественно схожи. В случае Карпат ситуация отличная: под дей-

ствием сжимающих напряжений, находящих отражение в региональном поле геоизостатических напряжений, возникли блоковые поднятия и происходило формирование покровов, к восточной границе которых и приурочена зона Вранча.

Можно утверждать, природа сейсмогенных зон Вранча и Крыма отличная: в первом случае сейсмичность определяется поднимающимися блоками Карпатского орогена относительно Мизийской плиты, а во втором – опусканием блоков Черноморской впадины относительно Крымского орогена.



(Сейсмогеологическая основа по Gîrbacea, R., Frisch, W., 1998)

Рис. 5. Сопоставление сечений плотностной модели с очагами землетрясений Крыма (а) и зоны Вранча (б): 1 – рельеф; 2 – аномалия Фая; 3 – аномалия Буге

Возникает вопрос: почему, несмотря на то, что для всего Карпатского региона и всей северной границы Черноморской впадины характерны аномалии геоизостатических напряжений и повышенная сейсмичность, основная сейсмическая энергия выделяется в относительно локальных зонах? Данный факт также находит объяснение в рамках блоковой модели тектоносферы. Если мы обратимся к наиболее цитируемой на сегодняшний день схеме глубинного строения тектоносферы Украины [10], то мы увидим, что территорию Украины пересекает три мантийных разлома северо-восточного простирания (рис. 6). Два из них пересекают Карпаты и Крым, именно в узлах пересечения ими аномалий геоизостатических напряжений и происходят основные сейсмические события. В зоне пересечения третьего (центрального) мантийного разлома с границей сочленения Восточно-Европейской платформы и Скифской плиты, которой также соответствуют аномальные значения геоизостатических напряжений, отмечается область повышенной сейсмичности северо-западного шельфа Черного моря, расположенная восточнее о. Змеиный. Характерной особенностью, подтверждающей важную роль влияния данных разломов на сейсмичность рассматриваемых регионов, является вытянутость облаков эпицентров землетрясений в пределах всех перечисленных областей в северо-восточном направлении.

Для более детального изучения напряженного состояния и внутренней структуры сейсмоактивных

сегментов Карпат и Крыма был выполнен расчет и анализ геоизостатических напряжений по наземным гравиметрическим данным. Разработана технология восстановления аномалий геоида по наземным гравиметрическим данным на основе аппроксимационного подхода, используя аномалии силы тяжести в редукции Фая.

Первоначально было выполнено восстановление высокочастотных аномалий геоида, а затем расчет геоизостатических напряжений зоны Вранча и южной части Крыма и сопредельной акватории Черного моря. Как и в случае определения напряжений по спутниковым данным, выполнялось разделение полей напряжений на локальную и региональную составляющие. Такое разделение позволяет проанализировать напряженное состояние геологических структур земной коры разного порядка. Выполненные расчеты напряжений показали, что в локальном и региональном поле геоизостатических напряжений находят отражение границы блоков земной коры различного порядка. Границы между блоками, по которым происходят субвертикальные смещения, проявляются в виде линейно вытянутых аномалий максимальных касательных напряжений, субгоризонтальные перемещения блоков – в виде смещения осей линейно вытянутых аномалий максимальных касательных напряжений. В напряжениях находят отражение элементы, являющиеся тектонической основой сейсмогенерирующих структур (рис. 7).

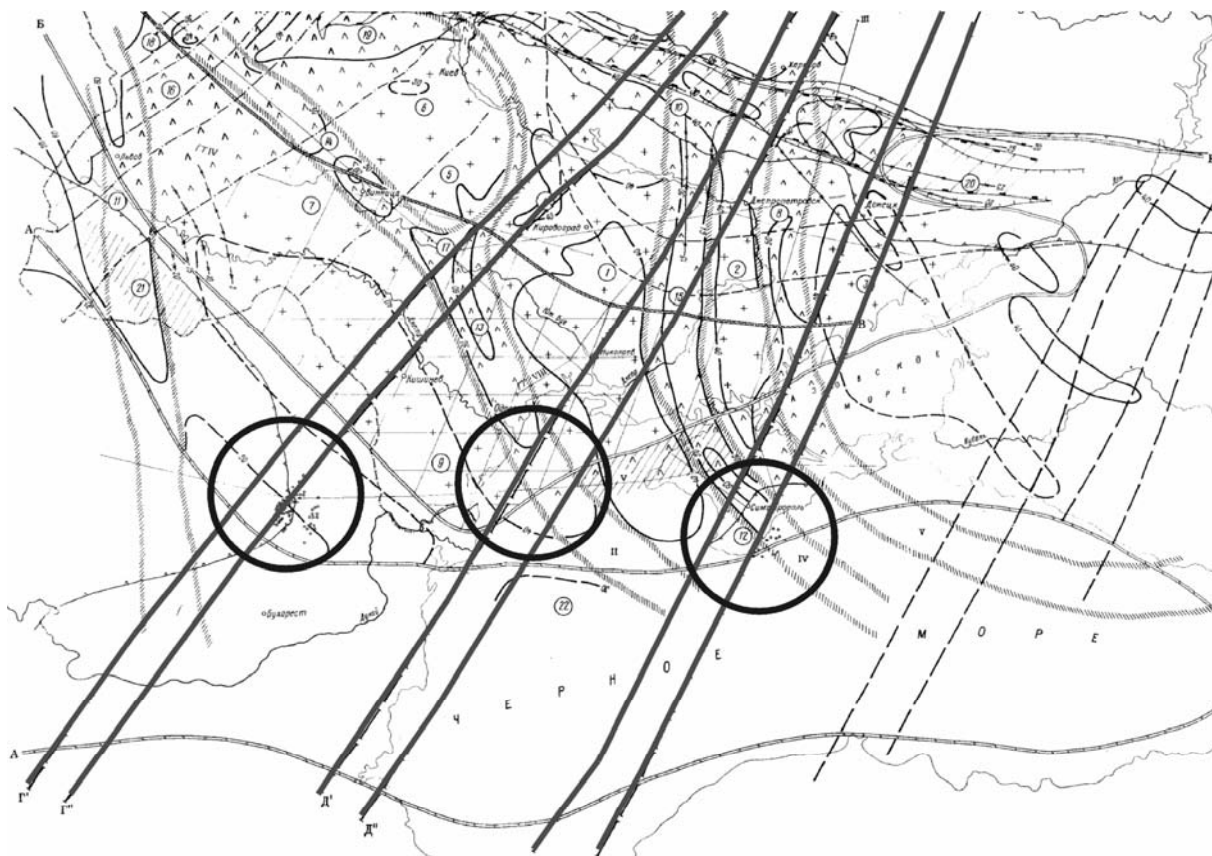


Рис. 6. Фрагмент схеми глибокого строення тектоносфери України

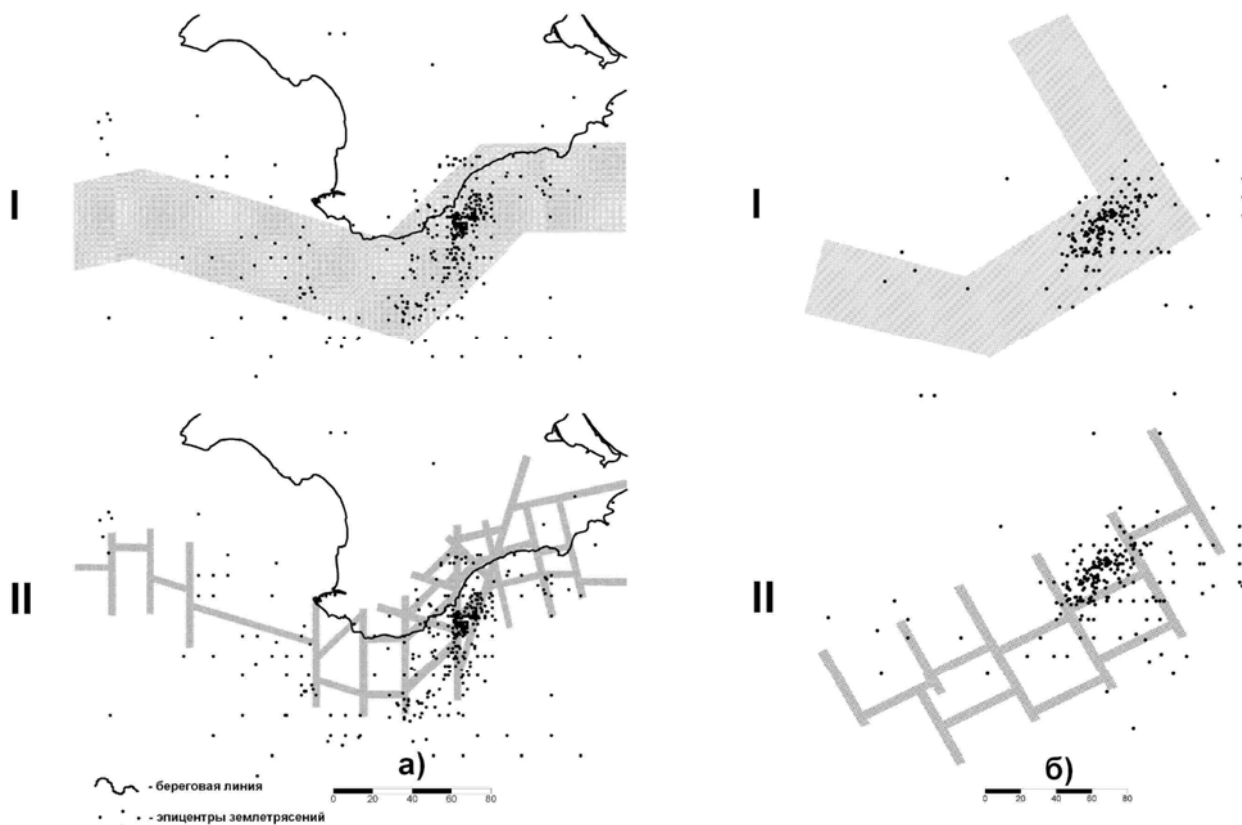


Рис. 7. Сейсмогенеруючі структури Криму (а) і зони Вранча (б), що знаходяться в полях геоізо-статических напружень: I – умовно першого порядку; II – умовно другого порядку

Именно с этими напряжениями, а фактически с границами блоков, связано большинство сейсмических событий. Учитывая высокие значения геоизостатических напряжений, можно утверждать о высокой неотектонической активности выделенных зон, с которыми возможно связана не только повышенная сейсмичность, но и оползневые процессы, аномальные величины современных движений земной коры и др. В целом сейсмичность рассматриваемых регионов определяется узлами пересечения разломных зон; особенности расположения очагов землетрясений в пределах данных зон определяются границами взаимодействия их отдельных фрагментов – тектонических блоков более мелкого порядка.

В настоящей работе автор не ставил перед собой целью критику той или иной тектонической гипотезы. В то же время хотелось бы отметить, что выполненные исследования позволяют утверждать – при изучении континентальной сеймотектоники не стоит однозначно отдавать предпочтение явлению субдукции, как основному механизму, обуславливающему сейсмические процессы. Использование разломно-блоковых моделей позволяет в ряде случаев объяснять наблюдаемые геологические явления значительно эффективнее.

Список литературы

1. Тяпкин К. Ф. Новая ротационная гипотеза структурообразования и геоизостазия // Геофиз. журн. – 1980. – № 5. – С. 40-46.
2. Тяпкин К. Ф. Новая модель геоизостазии и тектогенез // Геол. журн. – 1985. – № 6. – С. 1-10.
3. Клушин И.Г. Взаимосвязь тектонических движений и магматизма Земли на основе вариационного принципа наименьшего действия // Записки Ленинградского горного ин-та. 1963. – Т. XLVI., вып. 2. – С. 33-50.
4. Шен Э.Л. Типы внутренней структуры Земли и возможные схемы эволюции Земли и планет // Изв. АН СССР. Физика Земли. – 1991. – № 2. – С. 18-25.
5. Кузнецов В.В. Физика Земли: обоснование и разработка модели «горячей» Земли. – Камчатка: ИКИР, 2006. – 465 с.
6. Довбнич М. М. Нарушение геоизостазии и напряженное состояние тектоносферы // Геофиз. журн. – 2008. – № 4. – С. 123-132.
7. Довбнич М.М. Разночастотные составляющие аномалий геоида, их структура и природа // Геофиз. журн. – 2007. – № 5. – С. 201-212.
8. Довбнич М.М. Опыт построения 3D плотностных моделей на основе частотной селекции гравитационного поля / Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей. Матер. 31 сессии Междунар. семинара им. Д.Г. Успенского. – М.: ОИФЗ РАН, 2004. – С. 24-25.
9. Довбнич М.М., Демянец С.Н. Поля напряжений тектоносферы, обусловленные нарушением геоизостазии и геодинамика Азово-Черноморского региона // Геофиз. журн. – 2009. – № 2. – С. 107-116.
10. Соллогуб В.Б. Литосфера Украины. – К.: Наук. думка, 1986. – 184 с.

Рекомендовано до публікації д.г.-м.н. К.Ф. Тяпкіним 30.11.09