

## Важные шаги в изучении тектоносферы Украины

© В. И. Старостенко, 2010

Институт геофизики НАН Украины, Киев, Украина

Поступила 14 декабря 2009 г.

Представлено членом редколлегии О. Б. Гинтовым

Наведено огляд монографій В. В. Гордієнко та його співавторів про результати вивчення глибинної будови тектонічних регіонів України, які ґрунтуються на використанні адвекційно-поліморфної гіпотези процесів, що відбуваються в тектоносфері.

A review of the monographs of V. V. Gordienko and his co-authors on the results of the studies of deep structure of tectonic regions of Ukraine has been done based on application of advection-polymorph hypothesis of the processes which take place in tectonosphere.

Две монографии коллектива авторов [Гордиенко и др., 2005, 2006], посвященные проблемам Украинского щита (УЩ) и Днепровско-Донецкой впадины (ДДВ), представляют собой часть большой работы, направленной на обзор результатов исследований методами глубинной геофизики и моделирования процессов в тектоносфере Земли в основных тектонических регионах Украины. В настоящее время сдана в печать монография [Гордиенко и др., в печати], посвященная строению Вольно-Подольской плиты. В таком полном виде задача в Украине поставлена впервые, очевидным достоинством ее решения будет гарантия единства подхода к анализу геолого-геофизической информации. Значительная часть экспериментальных данных в области геотермии и геоэлектрики, изучения изотопного состава гелия получена самими авторами. По предшествующим публикациям и участию в написании разделов монографий видна специализация соавторов: В. В. Гордиенко — модели глубинных процессов, геотермия, гравиметрия, магнитометрия; И. В. Гордиенко, О. В. Завгородняя, О. В. Усенко — геотермия; С. Ковачикова, И. М. Логвинов, В. Н. Тарасов — геоэлектрика. Но во многих случаях жестко это не фиксируется: петрология, часть глубинных процессов, связанных с магматизмом, — ос-

новная работа О. В. Усенко, изотопия гелия — В. Н. Тарасова, в геоэлектрических исследованиях принимал участие И. В. Гордиенко. При такой мобильности естественней достигается комплексность подхода к изучению Земли.

Структура монографий (несмотря на некоторые различия в названиях и последовательности глав) в общем одинакова, так как она подчинена принятой логике исследования, заметно отличающейся от распространенной в геолого-геофизической литературе.

Обычно теоретическая модель — схема глубинного процесса — прилагается к изучаемому региону в виде распределения физических свойств пород тектоносферы на начальном этапе его истории. Последующая эволюция — нагревание или охлаждение, растяжение или сжатие, погружение или всплытие — сопоставляется с фактами геологической истории, причем аномальность свойств подбирается так, чтобы достичь согласования модельных и экспериментально изученных явлений. Такая же операция выполняется при интерпретации физических полей, за исключением результатов сейсмологии и геоэлектрики (свойства пород в теоретической модели подбираются под установленные этими методами параметры среды). Если полученные на выходе распределения физических свойств

пород коры и верхней мантии не выходят за разумные рамки (оценка свойств часто субъективна), можно утверждать, что принятая схема глубинного процесса может быть качественно согласована с геолого-геофизической информацией по региону.

В монографиях (и других работах авторов) используется адвекционно-полиморфная гипотеза (АПГ) [Гордиенко, 1998, 2007], по которой в соответствии с типом эндогенного режима, размерами региона и возрастом активного процесса строятся распределения всех физических свойств вещества тектоносферы для каждого момента его развития и сравниваются с гравитационным и магнитным полями, тепловым потоком, получаемыми путем решения прямых задач. Параллельно рассчитываются геологические события в приповерхностной зоне — опускание и седиментация, поднятие и эрозия, глубина и время появления очагов магматизма в коре и верхней мантии, а также возраст и интенсивность метаморфизма. Все эти геолого-геофизические параметры должны согласовываться с экспериментально установленными в рамках погрешностей наблюдений и расчетов. Несомненно, достоверность модели процесса, верифицированной таким образом, намного выше, чем при первом подходе, и увеличивается по мере роста количества и точности используемой информации. Отсюда понятно стремление авторов привлечь к рассмотрению как можно больший объем разнообразных независимо полученных данных и применить указанную методику к возможно большему числу регионов с различными видами и возрастами активности.

Подобные операции выполнены для разнотипных фрагментов континентов, океанов и переходных зон [Гордиенко, 1998, 2007], построены модели геологических событий для всей территории Украины [Гордиенко и др., 2003]. Эти результаты послужили основой для детальной проработки информации по отдельным регионам, начатой в рассматриваемых монографиях.

Очевидно, что для реализации описанного выше подхода к изучению тектоносферы необходима очень детальная проработка гипотезы, позволяющая для каждого конкретного варианта ее использования строить достаточно подробные и точные модели распределения физических свойств вещества коры и верхней мантии. Своеобразной проверкой АПГ послужили результаты анализа глубинных процессов в докембрии УЩ. Использо-

ваны стартовые условия 4,2 млрд лет назад (отвечающие принятой модели начальной эволюции Земли), наличие радиогенной теплогенерации в коре и мантии (и ее изменение во времени), определенной по концентрациям К, U и Th в глубинных ксенолитах. Весь дальнейший ход тепломассопереноса рассмотрен как результат саморазвития такой системы в рамках АПГ. Независимо от данных о геологической истории щита были установлены:

- 1) возрасты около 60 периодов магматизма и/или метаморфизма;
- 2) момент появления длительно существующей коры;
- 3) характер процесса и длительность периода пермобильного этапа истории (до 2,8 млрд лет);
- 4) момент перехода от всеобщих активизаций к локальным;
- 5) изменение временных интервалов между соседними проявлениями активности;
- 6) температурный диапазон метаморфизма коровых пород и др.

Все перечисленные параметры совпали с наблюдаемыми на щите, за исключением некоторых древних датировок, для которых пород-носители могли не сохраниться. Этот уникальный результат в последующем повторен для всех щитов Земли.

Рассмотрена и давно обсуждаемая в геологической литературе проблема собственно образования щита, т. е. региона с многокилометровым эрозионным срезом и практически без осадочного чехла. Определенности результатов, упомянутых выше, здесь достичь не удалось, но возможные причины проанализированы, получены и количественные оценки суммарных перемещений поверхности в виде итога многих активизаций. Дополнительным результатом анализа оказалась констатация огромной интенсивности коромантийного обмена, исключаящая однонаправленное деплетирование мантии.

В ДДВ рассмотрен гораздо более короткий отрезок геологической истории (начиная с 1,75 млрд лет назад), но детальнее. Для основного события — герцинского рифтогенеза и дополняющей его мезозойской активизации — смоделированы первичное поднятие региона, последующее неравномерное опускание и осадконакопление, изменение мощности коры, магматизм, катагенетические изменения пород молодого чехла. Все эти характеристики процесса на количественном уровне согласуются с экспериментальными данными.

Анализ тепловой модели тектоносферы, опирающийся на представления гипотезы, в обоих регионах доведен до современности. Интересной особенностью этого результата оказались две зоны частичного плавления пород.

Глубинная астеносфера располагается в интервале глубин 700—1100 км и существует с глубокого докембрия под всей поверхностью Земли. Это — новая геосфера, ее наличие предполагал в свое время Б. Гутенберг по сейсмическим данным, но сегодня сейсмологи не находят четких указаний на данный объект. Хотя некоторые признаки имеются, а главное — аномально проводящий слой на таких глубинах фиксируется геоэлектрикой повсеместно. Последствия включения глобальной астеносферы в стандартную модель Земли могут оказаться весьма значительными.

В нижних горизонтах верхней мантии УЩ и ДДВ обнаруживается астеносфера (разной мощности), вещество которой участвует в процессах современной активизации. Как показал анализ геолого-геофизических данных по обоим регионам, на части их территории такой процесс уже идет, в частности с ним связана нефтегазоносность ДДВ.

В дополнение к изложенному уместно остановиться на результатах изучения петрологии пород щита и ДДВ. Проведенное изучение по целям близко к построению моделей тепло-массопереноса, но для достижения этого используется принципиально иной материал, что требует новых методических приемов.

Изучение магматических процессов занимает важное место в создании общей теории эндогенной активности Земли, поэтому попытка сформировать новое направление в их анализе представляется актуальной. Важно, что в монографиях это сделано на базе экспериментальных данных о составе изверженных пород, относящихся к весьма различным по тектонике и магматизму структурам фанерозоя и докембрия. В результате удастся не только рассмотреть проблемы эволюции расплавов в условиях стабильного состава исходного вещества и флюидного режима, но и проследить влияние изменений этих параметров на отделение, дифференциацию и завершающую сегрегацию магмы.

Экспериментальные данные, накопившиеся за последние 40 лет, определенно указывают на связь состава магмы с давлением в очаге, т. е. с его глубиной. Однако на такую простую зависимость накладываются влияния вариаций состава легкоплавкой составляющей

пород, флюидов и пр. Предпринятая в монографиях попытка установить и устранить такие "помехи" привела к созданию оригинальной методики анализа состава поверхностных и близповерхностных магматических пород. Разработанный подход заметно отличается своей комплексностью, привлечением большего числа параметров, характеризующих породу. Естественно, его применение ограничено районами, где такие параметры достаточно детально изучены. Применение методики к конкретным регионам привело к обнаружению закономерного изменения глубин очагов в ходе геологической истории. Сделан переход от изучения кайнотипных пород к анализу древних метаморфизованных первично-магматических пород, позволивший распространить разработанную методику на древние, в том числе докембрийские, образования.

Создание моделей глубинных (в частности мантийных) зон селективного плавления горных пород, начатое работами А. Рингвуда и Д. Грина, долгое время подразумевало изучение равновесного и неравновесного вариантов процесса и приуроченности очагов к интервалам глубин над астеносферой, внутри нее и под ней. После построения таких моделей для многих основных и ультраосновных пород стало ясно, что различия между ними не ограничиваются исходным составом и *PT*-условиями плавления. Для верного понимания событий необходимо учитывать другие факторы. На важность кислотно-основных взаимодействий флюида и расплава обратил внимание Д. С. Коржинский. Эти идеи развивались в результате последующих экспериментальных работ. Но до настоящего времени не было метода всестороннего учета большинства особенностей глубинного процесса внутри очага. Прделанная авторами работа в значительной мере восполняет данный пробел.

Значительным вкладом в методику анализа магматических процессов следует считать и привлечение внимания исследователей к эксталяционно выносимой части вещества, поступающего на поверхность в ходе активности магматического очага. В обоих регионах это позволило гораздо полнее представить состав исходного расплава в очаге и влияние магматизма на эволюцию мантии. В связи с рассмотренными особенностями магматических процессов появилась возможность сформулировать своеобразные представления об образовании месторождений известняка, солей, железных руд и пр.

В целом астеносфера рассмотрена как открытая система, а слой на ее кровле с максимальной степенью плавления — как реактор по выработке магмы, в том числе с участием малораспространенных в астеносфере компонентов. В результате для обоих регионов удастся показать, что разнообразие магм, образовавшихся при дифференциации одного глубинного расплава в одном диапазоне *PT*-условий, объясняется химическими преобразованиями в "реакторе" и последующим разделением их продуктов на фазы. Такой подход представляется довольно перспективным для решения множества задач.

Перенесение экспериментальных работ в реальные условия земных недр ранее далеко не всегда приводило к удовлетворительному решению обратной задачи. Ценность выполненной работы заключается прежде всего в создании удачной формы приложения результатов лабораторных экспериментов к восстановлению условий плавления. Применение разработанного подхода позволило установить наличие определенных закономерностей в глубинах размещения очагов, разнонаправленность изменений глубин магматических очагов (кровли астеносферы) в геосинклинальном и рифтовом процессах. Это — очень существенный результат работы, который создал условия для проверки реальности методики (ведь упомянутые глубины можно проконтролировать геофизическими данными и информацией о ксенолитах). Интересны и выявленные при анализе состава магматических пород в разных регионах изменения условий процесса, в том числе при переходе от выплавления архейских магм к образованию протерозойских и фанерозойских.

Существование нескольких стабильных (повторяющихся в процессе последующих активизаций) глубин мантийных очагов магмы (50—100—150—200 км) обосновано довольно большим количеством примеров магматизма разного возраста в пределах УЩ и ДДВ. Оно полностью согласуется с данными моделирования множества активных процессов в тектоносфере по АПГ, не только подтверждается общность схем перемещений вещества и кровли астеносферы докембрия и фанерозоя, но и выявляются различия, связанные с длинными непрерывными циклами активности в глубоком докембрии (в рамках "пермобильного" этапа геологической истории).

Геотермические исследования на щите и в ДДВ проведены в двух разных направлениях.

Это экспериментальная работа по определению теплового потока Земли (ТП) в регионах и построение тепловых моделей тектоносферы [Гордиенко и др., 2002].

Результаты авторов в экспериментальной области значительны: плотность сети определений ТП (хотя на щите она минимальна для крупных регионов Украины), достигнутая в основном в последние 15 лет, намного выше имеющейся на аналогичных структурах других стран. Это позволило выявить аномалии, ранее считавшиеся не характерными для платформенных регионов. Они достигают уровня, распространенного в альпидах, и явно указывают на современную геологическую активность части докембрийского щита и герцинского рифта. Обнаружение этих возмущений в значительной мере стало возможным благодаря разработке и повсеместному использованию авторами сложной системы поправок к наблюдаемой величине потока, учитывающих влияние палеоклимата, перетоков подземных вод, структур, сложенных породами с разной теплопроводностью. Именно по исправленным значениям ТП стало возможным достоверное определение плотности геотермических ресурсов недр. В пределах щита и впадины районы, где добыча тепловой энергии Земли представляется рентабельной (не дороже получаемой традиционным путем), невелики, а в случае УЩ еще полностью не выявлены. Но и известные ресурсы намного превосходят извлекаемые запасы горючих ископаемых Украины.

Тепловые модели коры и верхней мантии — главная часть моделей глубинных процессов. На них базируются прогноз геологических событий в приповерхностной зоне (которые только и доступны прямому изучению и сравнению с результатами моделирования), определение глубины и возраста очагов магматизма, распределения уровней катагенеза и метаморфизма пород и пр. Соответственно, в монографиях построен контроль правильности этих конструкций, дополнительно проверяемых данными геотермометров (температурами образования минерального ансамбля пород, обломки которых выносятся магмами в виде ксенолитов) и величиной ТП через поверхность. Но при согласовании моделей со всеми перечисленными критериями очевидны существенные черты тепловых моделей, не поддающиеся контролю. Это прежде всего связано с низкой теплопроводностью вещества тектоносферы. Даже очень значитель-

ные изменения температуры верхней мантии и нижней коры, сформированные теплопереносом, не проявляются в тепловом потоке через поверхность миллионы лет. Кроме того, вынос магм ограничен глубиной очагов 200—259 км. А события, заметно влияющие на геологические процессы, происходят и на больших глубинах. Авторам удалось убедительно показать, что на УЩ и в ДДВ складывается ситуация, при которой возникающие неопределенности не дают возможности установить даже самые основные характеристики последнего глубинного процесса по его тепловым проявлениям. Требуется привлечение дополнительных средств изучения тектоносферы. Речь идет о современной активизации с возрастом мантийных объектов в первые миллионы лет и коровых — в первые сотни тысяч лет.

Для этого процесса практически отсутствует контроль геологическими событиями. Те незначительные проявления активности, которые можно изучить на поверхности, не могут полностью отражать не завершившийся, а только начавшийся глубинный процесс. Другими словами, современная активизация (по мнению авторов монографий) выпадает из общего контекста анализа событий в коре и верхней мантии.

Необходимость в дополнительных источниках информации привела к использованию необычного для геофизики изучения химического и газового состава глубинных флюидов.

В принципе метод не нов. Многие данные взяты из литературных источников, но в развитие одной из разновидностей такого подхода авторы монографий внесли существенный вклад. Речь идет об изучении изотопии гелия. Дело в том, что относительное содержание  $^3\text{He}$  в мантии на три порядка больше, чем в коре. Поэтому даже небольшой вынос мантийного вещества (флюида) на доступную для наблюдения глубину создает заметные аномалии  $^3\text{He} / ^4\text{He}$ . Авторы обобщили значительный объем известных экспериментальных данных и дополнили их собственными результатами определения отношения  $^3\text{He} / ^4\text{He}$ . Существующая сеть наблюдений на щите и в ДДВ редка и неравномерна, но все же можно утверждать, что на части территории обоих регионов произошли активные события в верхней мантии, возникли очаги частичного плавления, отделяющиеся от них расплавы и флюиды проникли в кору, флюиды достигли поверхности.

Другой возможностью контроля молодого глубинного процесса могут служить данные методов сейсмологии и геоэлектрики.

Сейсмологическая информация, пригодная, по мнению авторов, для использования, на территории рассматриваемых регионов довольно ограничена. В коре это зоны пониженных скоростей и сокращение мощности коры. Но всегда остается неясным, вызваны ли такие аномалии последней активизацией.

Исследования электромагнитного поля Земли, результаты которых отражены в монографиях, проходили в последние годы в ситуации быстрых изменений всех компонент метода. На смену аналоговой пришла цифровая аппаратура, ручная обработка заменена автоматизированной (появились реальные оценки погрешностей экспериментальных данных), введены методы инверсии, обеспечившие модельные представления, если и не адекватные реальности, то, по крайней мере, позволяющие оценивать степень соответствия. В обоих регионах в течение десятилетий накапливалась информация, которую можно и нужно использовать, так как данные последних лет, несмотря на значительное повышение темпов работ, не обеспечивают минимальную плотность сети наблюдений для достоверного моделирования.

Поэтому авторы уделяют значительное внимание переоцифровке аналоговых записей, переработке данных, ревизии прежних представлений о моделях среды, среди которых основную роль играет использование глубинных магнитовариационных зондирований. По полученным на стационарных магнитных станциях длиннопериодным вариациям стандартизованы геоэлектрические разрезы мантии на значительных территориях и сосредоточено внимание на особенностях коровых и верхнемантийных моделей. Наличие в обоих регионах определенного количества высококачественных данных, полученных авторами, позволило разбраковать результаты прошлых лет, привлечь к интерпретации наиболее пригодную для этого информацию прошлого.

Геоэлектрика — область геофизики, где сотрудничество авторов со специалистами других стран было особенно значительным. В проекте по глубинным магнитовариационным зондированиям вместе с авторами принимали участие геофизики России, Белоруссии, Польши, Венгрии, Румынии. На территории УЩ и его склонов работали геоэлектрики из Польши и Чехии.

Все шаги инверсии выполнялись с постоянным учетом всевозможных ограничений несовершенных моделей и неполноты сетей наблюдений. В некоторых районах вся интерпретация была ограничена одномерными инверсиями, в других построены двумерные и квазитрехмерные (пленочные) модели. Детально исследована верхняя часть разреза — осадочный слой и верхняя часть фундамента (на щите). Привлечены сведения о результатах лабораторных исследований электропроводности пород и данных малоглубинных методов. И только затем анализировалась часть информации, в которой могли отразиться глубинные проводники.

Такой подход принес свои плоды: наряду с известной Кировоградской аномалией электропроводности, пересекающей весь щит и впадину (параметры уточнены и дифференцированы по простиранию объекта), авторам удалось обнаружить множество менее интенсивных возмущений в коре и верхних горизонтах мантии. Практически все они могут быть увязаны с зонами современной активизации. Причем во многих случаях геоэлектрические данные были самыми существенными при выделении зон.

Особенно эффективным применение геоэлектрики оказалось в ДДВ, где тепловые аномалии отмечаются только в виде локальных всплесков на отдельных нефтегазоносных структурах. Проводники, максимальное развитие которых довольно точно приурочено к продольным и поперечным глубинным разломам, обнаружены в юго-восточном, Днепровском, бассейне впадины и отсутствуют в северо-западном — Деснянском. Проводники располагаются под осадочным слоем в толще предположительно рифейского возраста и по параметрам вполне могут соответствовать результатам пропитки этой толщи (вероятно, в какой-то мере графитизированной) глубинными магматическими флюидами над очагами частичного плавления пород нижней и средней частей коры в зоне современной активизации.

На щите обнаружены две разновидности моделей, включающих проводники. Для одной модели характерно распространение проводников в коре (вплоть до раздела Мохо). Здесь трудно судить о наличии или отсутствии мантийных объектов, хотя иногда проводящие зоны формально выходят за пределы коры. Другая разновидность представлена именно мантийными проводниками. Можно предпо-

ложить, что это — районы самой молодой активизации, в которых еще не произошел вынос перегретого и частично расплавленного вещества в кору.

К решению вопроса о существовании зон современной активизации и их границах привлечены и данные гравиметрии. Указанием на недавно произошедший вынос перегретого вещества с больших глубин под кору может быть обнаружение гравитационного эффекта разуплотненного объекта. Предварительные оценки авторов показали, что мантийная аномалия, вызванная таким объектом, должна быть небольшой (порядка 20 мГал). Она всего лишь в 2 раза превосходит вероятную погрешность сравнения расчетного и наблюдаемого полей. Поэтому для выделения подобных возмущений разработана и опробована специальная методика.

В частности, авторам удалось показать, что магнитоактивные объекты в средней (иногда и верхней) и нижней частях коры щита должны проявляться в заметных аномалиях плотности, не создавая реально фиксируемых сейсмическими методами скоростных аномалий. Причина — в резком отличии свойств оксидов и сульфидов металлов от свойств силикатов. Поэтому пересчет скорости в плотность для расчета гравитационного эффекта коры дополнялся учетом плотностных возмущений "рудной" природы.

В результате установлено, что гравитационные аномалии на территории УЩ и ДДВ образуют систему, наследующую весьма разновозрастные элементы структуры земной коры регионов. Они почти полностью соответствуют электропроводящим объектам в коре и верхней мантии, на щите частично совпадают с аномалиями теплового потока.

Авторам удалось привлечь к диагностике активизации также сведения о движениях поверхности за последние миллионы лет в обоих регионах, данные о внедрениях флюидов большой глубинности (и своеобразного химического состава) в осадочный слой ДДВ, в небольшой мере (скорее всего вследствие низкой степени изученности) данные о слабой сейсмичности территории.

Комплексирование перечисленных геолого-геофизических признаков зон современной активизации позволило с большей определенностью провести их границы, хотя до завершения этой работы на щите (да и части ДДВ) еще далеко вследствие многочисленных "белых пятен" на схемах изученности разными методами.

Нельзя не отметить и такой "побочный продукт" изучения активизации, как методика выявления районов перспективной нефтегазоносности. Аргументы в пользу недавнего появления углеводородов в верхней части коры (приводимые в последние годы многими авторами) представляются достаточно весомыми. Поэтому признаки современной активизации переносятся на нефтегазоносность (при наличии условий для образования скоплений и сохранения месторождений).

Предлагаемый комплекс исследований нефтегазоносности и приемы анализа геолого-гео-

физических данных важно опробовать в других регионах с месторождениями углеводородов (прежде всего — в Предкарпатье).

В целом опубликованные в монографиях результаты изучения глубинных процессов и физических полей двух крупных регионов Украины представляются значительным вкладом не только в познание структуры и эволюции тектоносферы УЩ и ДДВ, но и в развитие общих представлений о глубинных процессах Земли, разработку методики поисков месторождений полезных ископаемых, имеющих отношение к расширению энергетической базы Украины.

### Список литературы

- Гордиенко В. В.* Адвекционно-полиморфная гипотеза процессов в тектоносфере. — Киев: Корвін пресс, 2007. — 172 с.
- Гордиенко В. В.* Глубинные процессы в тектоносфере Земли. — Киев: Ин-т геофизики НАН Украины, 1998. — 85 с.
- Гордиенко В. В., Гордиенко И. В., Завгородняя О. В., Ковачикова С., Логвинов И. М., Пек Й., Тарасов В. Н., Усенко О. В.* Днепровско-Донецкая впадина (геофизика, глубинные процессы). — Киев: Корвін пресс, 2006. — 142 с.
- Гордиенко В. В., Гордиенко И. В., Завгородняя О. В., Ковачикова С., Логвинов И. М., Тарасов В. Н., Усенко О. В.* Вольно-Подольская плита (геофизика, глубинные процессы). — Киев: Наук. думка. — В печати.
- Гордиенко В. В., Гордиенко И. В., Завгородняя О. В., Ковачикова С., Логвинов И. М., Тарасов В. Н., Усенко О. В.* Украинский щит (геофизика, глубинные процессы). — Киев: Корвін пресс, 2005. — 210 с.
- Гордиенко В. В., Гордиенко И. В., Завгородняя О. В., Усенко О. В.* Тепловое поле территории Украины. — Киев: Знание Украины, 2002. — 170 с.
- Гордиенко В. В., Усенко О. В.* Глубинные процессы в тектоносфере Украины. — Киев: Ин-т геофизики НАН Украины, 2003. — 147 с.