

---

<https://doi.org/10.15407/gpimo2019.02.035>

**В.В. Гордиенко, Л.Я. Гордиенко**

Институт геофизики им. С.И. Субботина НАН Украины, Киев

## **АСТЕНОСФЕРНЫЕ ЛИНЗЫ В МАНТИИ НЕФТЕГАЗОНОСНЫХ РЕГИОНОВ**

---

*Рассмотрены экспериментальные и расчетные данные о распределении скорости продольных сейсмических волн в верхних горизонтах мантии зон современной активизации платформ, геосинклиналей (включая островные дуги), континентальных и океанических рифтов, задуговых впадин, континентальных окраин атлантического типа. С частью из них связаны месторождения или проявления углеводородов. Во всех случаях обнаружены отрицательные аномалии скорости, осложненные локальными положительными. На тех же глубинах обнаружены магматические очаги. Природа возмущений — перегрев и частичное плавление — подтверждается данными геоэлектрики, гравиметрии, аномалиями изотопии гелия и согласуется с представлениями адвекционно-полиморфной гипотезы.*

**Ключевые слова:** современная активизация, аномалии скорости, очаги магматизма.

### **Введение**

Эта работа представляет собой предварительный итог длительных исследований, посвященных изучению скоростных ( $V_p$ ) аномалий в подкоровой мантии зон современной активизации (СА), с частью из которых связаны месторождения углеводородов (УВ), и глубин магматических очагов в мантии [10, 13—15 и др.]. Используемая авторами адвекционно-полиморфная гипотеза (АПГ) глубинных процессов в тектоносфере Земли прогнозирует в этих регионах отрицательную скоростную аномалию (по сравнению с распределением  $V_p$  в мантии неактивной древней платформы), вызванную перегревом и частичным плавлением, и положительные возмущения в блоках коровых эклогитов, погружающихся в мантию до глубины примерно 200—250 км. На этой глубине их свойства уравниваются со свойствами окружающих пород, положительные скоростные аномалии исчезают.

Изучаемые СА распространены на докембрийских и более молодых платформах (вплоть до эпикиммерийских), в альпий-

© В.В. ГОРДИЕНКО, Л.Я. ГОРДИЕНКО, 2019

ских геосинклиналях и рифтах континентов, на островных дугах (по АПГ это тоже геосинклинали), в задуговых впадинах. Несколько в стороне от такого ряда располагаются срединно-океанические хребты (СОХ). Но в их осевых частях установлены районы значительного образования и выделения углеводородов. Поэтому данные по мантийным скоростным разрезам и магматическим очагам СОХ можно рассмотреть вместе с остальными. На континентальных окраинах атлантического типа также имеются нефтегазоносные районы и признаки современной активизации. Но они пока недостаточно изучены и, вполне вероятно, что низкоскоростные зоны в подкоровой верхней мантии не связаны с СА. Здесь возможны (по АПГ) и остаточные эффекты периода, когда окраины были активными [9]. Но и они заслуживают рассмотрения.

Работа проводилась в четырех направлениях.

1. Сбор и обобщение литературных данных о скоростных разрезах верхней мантии зон СА.

2. Построение скоростных разрезов авторами в тех регионах, где это было признано необходимым.

3. Создание расчетных разрезов, отвечающих тепловым моделям по АПГ. Последние отражали геологическую историю регионов, в том числе — предшествующую современной активизации. Кроме решения прикладной задачи — изучения процесса образования месторождений углеводородов — результаты сравнения экспериментальных и расчетных разрезов использовались для контроля схем глубинного теплопереноса.

4. Выделенные скоростные аномалии сопоставлялись с данными о расположении магматических очагов в мантии зон СА. Такое дополнение давало основу для адекватного геологического истолкования другой (не сейсмологической) геофизической информации.

К настоящему времени в большинстве регионов СА проведены сейсмографические исследования, построены 3D скоростные модели верхней мантии. Они предполагают гораздо большую детальность, чем достижимая при используемом авторами одномерном моделировании. В публикациях приводятся небольшие величины погрешностей. Однако методы их оценки вызывают вопросы. Не вдаваясь в существо дела, приведем некоторые сведения на эту тему. Наиболее объективной оценкой погрешности представляется сравнение результатов повторных экспериментов. Во многих районах построено более одной модели, что создает условия для таких сопоставлений. Данные по юго-востоку Европы и Черному морю [3, 24, 25, 30 и др.] обнаруживают расхождения 0,20—0,25 км/с. Предполагая ошибки сравниваемых моделей одинаковыми, определим типичную величину как 0,14—0,18 км/с. На Камчатке и прилегающей части океана, в сложной ситуации переходной зоны, построено несколько скоростных моделей мантии [5, 17, 26, 27]. Различия составляют около 0,15—0,3 км/с. Учитывая погрешность модели в статьях [5, 17] в 0,05—0,06 км/с, можно оценить ошибки привлеченных для сравнения в 0,14—0,29 км/с. При установленных погрешностях значительная часть выделяемых аномалий недостоверна. Примеры подобных сравнений можно продолжить, уровень выявляемых ошибок везде сопоставим с приведенным выше. Для контроля схем глубинных процессов эти данные неприменимы. Погрешности отвечают ложным аномалиям в глубинных температурах не менее 300—500 °С, что закрывает возможность изучения харак-

тера тепломассопереноса. Поэтому поставлена задача построить для всех типов регионов «авторские» модели. К настоящему времени она решена не до конца (см. ниже), но в целом удалось получить наиболее важные параметры с большой степенью достоверности, хотя построенные одномерные модели лишены многих подробностей.

## Методика

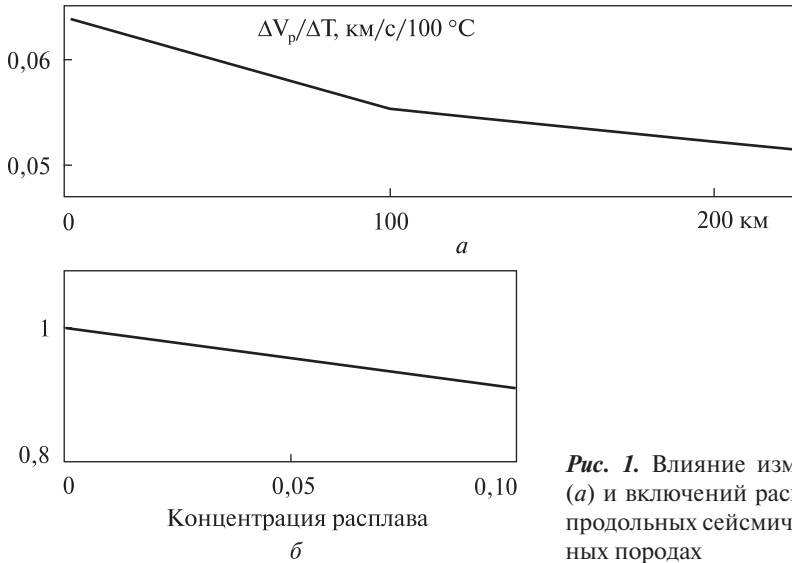
Подбор одномерных скоростных моделей проводился по годографам, построенным для времен пробега волн в пределах изучаемого региона. Глубины источников стандартизировались специальными поправками. Угловые расстояния достигали, как правило,  $25^\circ$ . Это позволяло «осветить» всю верхнюю мантию. Индивидуальные времена пробега волн осреднялись в скользящем окне размером  $0,4^\circ$ . Средние отклонения времен от осредняющей линии годографа в основном не превышали 1,5 с. Это позволяло рассчитывать (в значительных интервалах глубин, не менее 50 км) на ошибку определения скорости в несколько сотых долей км/с. Естественно, разброс точек — не единственный источник погрешности годографа и, в конечном счете, — скоростного разреза. Построение годографа начиналось, как правило, с углового расстояния в  $2-3^\circ$ . На меньших расстояниях разброс данных оказывался слишком большим. Расчетный годограф вычислялся по программе SEIS-83 И. Пшенчика и В. Червени. В качестве стартового разреза применялся результат осреднения ранее полученных моделей.

Расчетные модели были созданы следующим образом [8 и др.]. Сначала построен разрез мантии для неактивизированной платформы по принятому химическому и минералогическому составу пород и распределению температур, отвечающему этому типу эндогенного режима [9 и др.]. Скоростная модель для изучаемых регионов вычислялась по платформенной с учетом разниц в температурах на каждой глубине. В случае превышения температуры солидуса учитывалось влияние на скорость появившегося расплава.

Проведенный авторами анализ связи скорости с химическим составом распространенных мантийных пород [8] позволяет утверждать, что связанные с этим фактором вариации  $V_p$  незначительны. Рассмотрены литературные сведения о составах фертильной, недеплетированной и деплетированной мантии под континентами, океанами и переходными зонами. Изменения скорости оценены по среднему атомному весу в соответствии с законом Берча. Отклонения расчетных скоростей от полученных для принятого в АПГ среднего состава верхней мантии не превышают 0,03 км/с, средняя величина — 0,015 км/с. Сравнение с известными экспериментальными данными подтверждает полученные величины.

Ситуация меняется при появлении повышенных концентраций минералов с аномальными  $V_p$ . В рассматриваемом интервале глубин имеет значение увеличение относительного содержания гранатов, практически — замена части перидотитов эклогитами. Средний химический состав в этом случае заметно не изменяется, а скорость продольных сейсмических волн увеличивается на несколько десятых долей км/с.

Влияние температуры при различных давлениях (глубинах) на скорость Р-волн изучено довольно основательно [21, 29 и др.]. В рассматриваемом диапазоне глубин значения  $V_p$  изменяются на 0,05—0,06 км/с на  $100^\circ\text{C}$  (рис. 1). Ин-



**Рис. 1.** Влияние изменения температуры (а) и включений расплава (б) на скорость продольных сейсмических волн в мантийных породах

формации о влиянии на скорость расплава значительно меньше [1, 18 и др.], учет этого явления менее надежен. Однако реальные концентрации магмы незначительны (первые проценты по объему), большие количества жидкости не сохраняются в частично расплавленном объекте, сегрегируются и уходят из него с всплывающими астенолитами. Поэтому величины поправок в расчетные значения скорости невелики.

Полученные скоростные разрезы сопоставлялись с установленными ранее другими авторами и с расчетными. Согласующимися считались разрезы, расхождения между которыми можно было объяснить погрешностями обоих распределений  $V_p$  не выше 0,1 км/с.

Авторы провели серию исследований по определению глубин кровель магматических очагов и температур для основных и ультраосновных пород по всем типам эндогенных режимов на континентах, в океанах и переходных зонах. Использовались данные о концентрациях окислов алюминия и магния для примерно 70000 образцов [10, 11 и др.]. Часть этого материала, относящаяся к молодому и современному магматизму, была использована в данной работе.

### Зоны активизации платформ

Скоростной разрез верхних горизонтов мантии докембрийской платформы по АПГ приведен на рис. 2. Варианты соответствуют нормальной и пониженной теплогенерации в породах коры. Последних случаев по имеющимся данным сравнительно немного, но на континентах еще достаточно широко распространены регионы с неизученным или малоизученным тепловым потоком. Необходимо считаться с возможностью более широкого распространения «холодных» зон. В частности, в Северной Евразии при расчете модели платформенной мантии использовались значения температур, средние между нормальной и «холодной» платформами. Здесь широкое распространение мафических блоков коры [9 и др.] указывает на необходимость такого изменения стандартной модели.

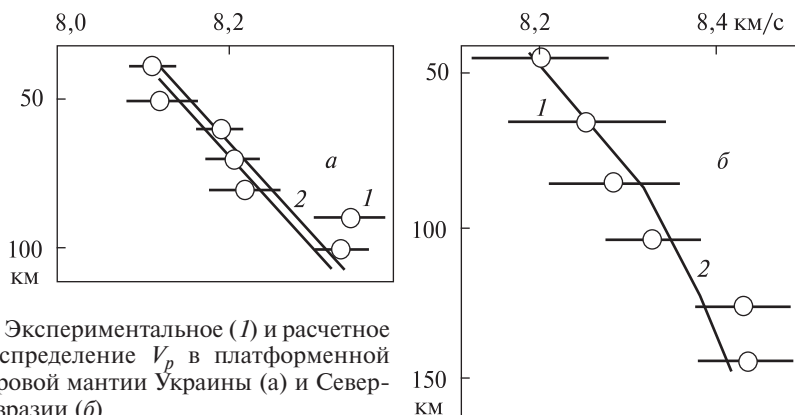


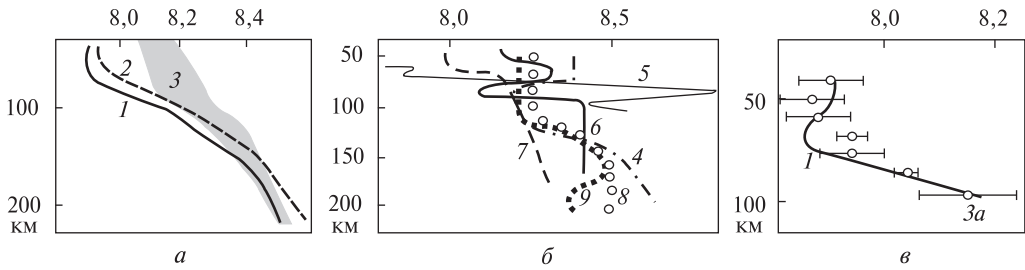
Рис. 2. Экспериментальное (1) и расчетное (2) распределение  $V_p$  в платформенной подкорковой мантии Украины (а) и Северной Евразии (б)

Собственные экспериментальные результаты авторов для этого типа эндогенного режима представлены в настоящее время только данными по территории Украины. Они охватывают довольно ограниченный интервал глубин — около 100 км (рис. 2). Полученные значения скорости близки к расчетным, среднее расхождение составляет всего 0,02 км/с. Среди многочисленных других платформенных скоростных разрезов наибольшего внимания заслуживают данные по Северной Евразии [28], часть территории которой относится к «холодным» (см. выше). Детальное изучение зон СА комплексом геолого-геофизических методов здесь отсутствует (как и везде за пределами Украины), поэтому неизбежно попадание в число используемых скоростных разрезов «активных». Это увеличивает разброс на каждой из глубин (рис. 2, б), но все же среднее расхождение между расчетной и экспериментальной моделями составляет в среднем только 0,04 км/с.

Согласование расчетных и экспериментальных разрезов мантии платформы достигается в рамках, обусловленных погрешностями, что говорит о правильности выбранного состава (и минералогии) пород, принятой тепловой модели и метода учета РТ-условий в мантии (рис. 1, а). На это указывают и данные табл. 1, иллюстрирующие результаты сравнения расчетной платформенной скоростной модели мантии с разрезами под платформами разных континентов. В данном случае сравнение проведено в интервале глубин от раздела Мохо до 450 км. Детали геологической истории привлеченных к рассмотрению регионов далеко не всегда известны, поэтому вероятно попадание в сравниваемые разрезы в зонах современной активизации платформ. Например, по некоторым (пока довольно неопределенным) сведениям в Северной Евразии до 50—75 % территории плат-

Таблица 1. Сопоставление экспериментальных и расчетного скоростных разрезов верхней мантии платформ

Платформа	Кол-во сопоставляемых разрезов	$\Delta V_p$ , км/с	Платформа	Кол-во сопоставляемых разрезов	$\Delta V_p$ , км/с
Сев. Американская	8	0,10	Индийская	4	0,13
Вост. Европейская	15	0,09	Сино-Корейская	2	0,14
Сибирская	12	0,08	Австралийская	4	0,12
Юж. Американская	4	0,09	Антарктическая	3	0,14
Африканская	4	0,11			



**Рис. 3.** Скоростные разрезы: *а* — докембрийских платформ Северной Евразии и Северной Америки в зонах современной активизации, *б* — локальные разрезы в зонах активизации платформ, *в* — докембрийской платформы в зонах современной активизации Украины. 1, 2 — расчетные разрезы для нормальной (1) и пониженной (2) теплогенерации в коре, в предположении среднего возраста начала активного процесса около 5 млн лет назад [9 и др.], 3 — диапазон экспериментальных данных (3а — разрез для зон СА Украины), 4 — Сибирская платформа [28], 5 — Припятский прогиб [20], 6, 7 — Балтийский щит, 8, 9 — Сев. Американская платформа

форм могут быть охвачены ею. Конечно, это увеличивает расхождения между расчетной и экспериментальными моделями.

Отметим, что методика учета влияния частичного плавления на распределение скорости проведенными сопоставлениями практически не контролируется. В верхней мантии неактивизированной платформы по АПГ присутствует слой с незначительной степенью частичного плавления непосредственно над кровлей переходной зоны к нижней мантии. Но достоверность его учета в расчетной модели невелика: на этом участке годографа эффект скоростной аномалии интенсивностью около 0,1 км/с в интервале глубин мощностью около 50—70 км практически неразличим.

В верхней части разрезов зон современной активизации платформ согласование значительно хуже (рис. 3). И в этом случае собственные данные авторов представлены пока только скоростным разрезом зон Украины в ограниченном интервале глубин (рис. 3, *в*). Полученные значения  $V_p$  оказываются заметно выше расчетных даже для случая холодной мантии (рис. 3, *а*). На рассматриваемой территории Украины такая мантия по имеющимся данным отсутствует.

Можно предположить, что несоответствие расчетных скоростей в подкоровой мантии зон СА платформ Северной Евразии экспериментальным связано с неучетом в расчетных моделях попадания в подкоровую мантию высокоскоростных эклогитизированных коровых блоков. Локальные разрезы подтверждают эту гипотезу: значения  $V_p$  оказываются высокими только в отдельных интервалах глубин (рис. 3, *б*). Для некоторых регионов доказано присутствие в мантии заметного количества коровых эклогитов [8].

Судя по значениям скорости в построенных моделях зон активизации, на глубинах около 50 км может располагаться в некоторых случаях кровля слоя частичного плавления в мантии. Вероятно, распространены и ситуации, когда астеносферная линза уже кристаллизовалась, магматизм в зонах СА отнюдь не повсеместен. В частности, такой случай показан на рис. 3. Однако в тех регионах, где магматические проявления присутствуют (Алдан, Витим, Чешский массив), состав эффузивов указывает на глубину очага около 50 км. Впрочем, столь резкие

различия в магматических проявлениях могут говорить о неверном определении типа эндогенного режима. СА вообще занимает особое место в наборе схем глубинных процессов, построенных по представлениям адвекционно-полиморфной гипотезы. Явная незавершенность цепочки геологических событий, относимых к данному типу эндогенного режима, не дает возможности построить и полную однозначную схему тепломассопереноса. Не исключено, что в некоторых случаях за проявления современной активизации принимаются события начала рифтогенеза. Именно к ним может относиться инициальный магматизм. Необходимо отметить и тот факт, что в изученных авторами районах СА платформ с проявлениями магматизма месторождения углеводородов отсутствуют.

Тем не менее, полученные экспериментальные данные можно истолковать как указание на существование в зонах СА платформ подкорового слоя, в котором эффект перегрева по сравнению с неактивной платформой и частичного плавления имеет место, но в значительной мере маскируется влиянием высокоскоростных блоков эклогитов, погружившихся в настоящее время на разную глубину. «Остаточные» отличия от платформенного скоростного разреза присутствуют на глубинах от раздела М до примерно 150 км, но они не превышают 0,10—0,15 км/с. Единичная скоростная аномалия такой незначительной интенсивности не может считаться достоверной. Но массовость выявленных возмущений позволяет считать их реальными.

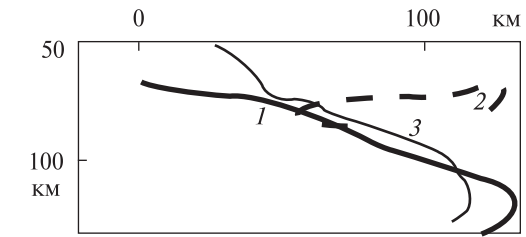
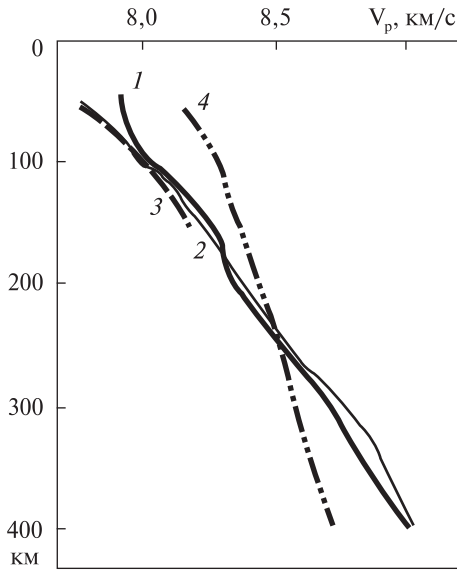
### **Зоны активизации геосинклиналей**

По геологическим данным практически во всех альпийских геосинклиналях идет современная активизация, дополняющая основной процесс.

Скоростные разрезы верхней мантии островных дуг Тихого океана и береговых хребтов Кордильер и Анд (все эти регионы по представлениям АПГ не отличаются от внутриконтинентальных геосинклиналей) были построены авторами до глубин подошвы верхней мантии (примерно до 450 км). Изучены и фрагменты дуг на периферии Индийского океана. В число исследованных вошли дуги: Алеутская, Яванская, Курильская, Тонга, Японская, Кермадек, Ново-Зеландская, Тайваньская, Идзу-Бонинская, Соломонова, Ново-Гвинейская, Филиппинская, а также Аляска, Камчатка, Южные Анды, Северные Анды, Северные Кордильеры и Южные Кордильеры.

Построенные для этих регионов годографы (за исключением годографа для дуги Тонга, исключенного из рассмотрения) различаются между собой не больше, чем это допустимо по уровню погрешностей. Поэтому был построен сводный годограф и, соответственно, единый скоростной разрез верхней мантии.

Во всем интервале глубин верхней мантии построенный разрез удовлетворительно согласуется с расчетным (рис. 4). Расхождения в среднем составляют 0,1 км/с. В подкоровом интервале глубин они сокращаются до 0,05 км/с. Большая интенсивность подкоровой отрицательной скоростной аномалии нивелирует влияние высокоскоростных блоков. В расчетную модель они не включены, тем не менее, непосредственно под корой расчетная скорость оказывается несколько больше экспериментальной (рис. 4). Возможно, здесь сказывается характерная для такой степени прогрева замена гранатового лерцолита шпинелевым (т. е. изменение минералогии без заметного изменения химсостава). Более детальная



**Рис. 5.** Глубина кровли астеносферы по сейсмологическим данным под Восточной Камчаткой [5, 8 и др.]: 1 — юг, 2 — центр, 3 — север

◀ **Рис. 4.** Сравнение экспериментальных скоростных разрезов верхней мантии геосинклиналей Тетиса (1), полученных авторами, и скоростных разрезов островных дуг и береговых хребтов Тихоокеанского кольца (2); 3 — распределение скорости при температуре солидуса пород мантии, 4 — скоростной разрез под неактивизированной платформой

скоростная модель под Камчаткой [5, 17 и др.] обнаруживает сложность распределения  $V_p$  под корой, включая блоки с аномально повышенными скоростями.

Построенный скоростной разрез позволяет прогнозировать зону частичного плавления примерно в интервале глубин от 80 до 110–120 км. Это обстоятельство создает дополнительные возможности для контроля достоверности модели. По составу молодых магматических пород геосинклиналей можно судить о глубине кровли их очагов (определяется среднее значение для всего периода действия очага). Такая информация, полученная авторами, сведена в табл. 2.

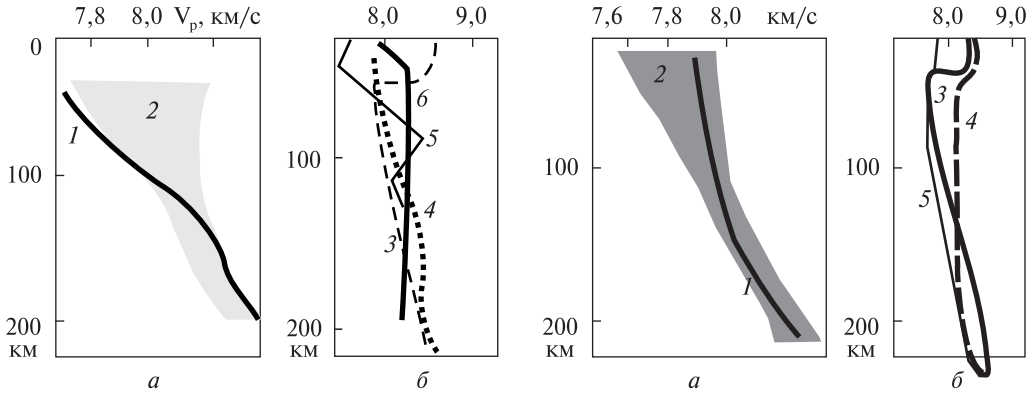
Очевидно практическое совпадение данных из независимых источников, которое подтверждает правильность примененного подхода к геологическому истолкованию аномалий скорости.

Детальные скоростные модели, построенные, например, для Восточной Камчатки [5 и др.], позволяют проследить и довольно существенные изменения глубины кровли подкоровой астеносферы (рис. 5). Она зависит от близости к краю активного объекта, расположения зон современной активизации и т. п. На рис. 5 нуль пикетов профиля совпадает со Срединным хребтом полуострова.

**Таблица 2.** Глубины очагов молодого и современного магматизма в мантии островных дуг

Регион	Глубины очагов, км	Регион	Глубины очагов, км
Аляска	55–100	Бонинская и Марианская дуги	55–85
Алеуты	55–105	Австралийские о-ва	50–90
Командоры	55–100	Фиджи	50–95
Корякия	55–90	Тонга-Кермадек	50
Камчатка	55–90	Новая Британия	55–85
Курилы	55–95	Соломоновы о-ва	55–85
Сахалин	50–100	Новая Зеландия	65–100
Хонсю, Рюкю	50–90	Антильская дуга	50–90
Филиппины	50	Дуга Скотия	85





**Рис. 6.** Скоростные разрезы: *a* — сравнение скоростных разрезов верхней мантии геосинклиналей Тетиса (2) с расчетной моделью для геосинклинали по АПГ (1); *б* — локальные модели (3 — Карпат, 4 — Гиндукуша, 5 — Апеннин, 6 — Альп)

**Рис. 7.** Скоростные модели: *a* — сравнение скоростных моделей верхней мантии континентальных рифтов (2) с построенной авторами (1), *б* — локальные модели (3 — Лигурия, 4 — провинция Бассейнов и Хребтов, 5 — Рио Гранде)

Очевидно, что очаги молодого магматизма, приуроченные к кровле астеносферы, могут располагаться на глубинах от менее 50 до 110 км.

Скоростные разрезы подкоровой мантии внутриконтинентальных геосинклиналей представлены также по многочисленным публикациям преимущественно сейсмотомографическими моделями. Были отобраны скоростные разрезы основных геосинклиналей Тетиса. Практически во всех случаях можно говорить об осложнении постгеосинклинального развития регионов процессом современной активизации.

Скоростные разрезы мантии геосинклиналей отличаются от расчетного, диапазон экспериментальных данных на подкоровых глубинах довольно велик. Тем не менее, явно просматривается отрицательная скоростная аномалия, осложненная влиянием множества положительных. Это подтверждают и локальные модели (рис. 6, б).

При сравнении полных (до глубины примерно 450 км) скоростных разрезов верхней мантии альпид с расчетным (табл. 3) обнаруживается приемлемая степень согласования. Трудно ожидать большего при имеющейся погрешности экспериментальных данных (см. выше). На больших глубинах возмущения распространены меньше. Исключение — интервал глубин у кровли переходной зоны

**Таблица 3.** Отличия экспериментальных скоростных разрезов верхней мантии под геосинклиналями Тетиса от расчетного

Регион	$\Delta V$ , км/с	Регион	$\Delta V$ , км/с	Регион	$\Delta V$ , км/с
Атлас	0,13	Понтиды	0,09	Загрос	0,10
Апеннины	0,10	Карпаты	0,11	Гиндукуш	0,11
Альпы	0,09	Кавказ	0,12	Гималаи	0,12
Динариды	0,13	Эльбурс	0,14	Сонгпан	0,08
Эллиниды	0,13	Балканиды	0,09	Среднее	0,11

**Таблица 4. Глубины очагов молодого и современного магматизма в мантии геосинклиналей Тетиса**

Регион	Глубины очагов, км	Регион	Глубины очагов, км
Сихотэ-Алинь	55—75	Загрос	50—110
Малый Кавказ	55—100	Тибет	45—80
Родопы	55—105	Тавр	55—85
Чукотка	55—80	Апеннины, Корсика	55—85
Сев. Вьетнам	50—95	Пиндос	55—90
Сулейман Даг	40	Кипр, Сирия	65—85
Эльбурс	70—100	Гималаи	65—90

между верхней и нижней мантиями. Возникающее здесь существенное различие между сравниваемыми разрезами обусловлено, прежде всего, спецификой построения сейсмоотографических моделей. Поэтому в описываемом сопоставлении эти данные не участвовали.

В целом результаты сравнений можно расценить как указывающие на совпадение скоростных разрезов в рамках погрешностей.

Глубины кровель магматических очагов под геосинклиналями Тетиса, как и под островными дугами и береговыми хребтами, согласуются с расположением скоростных аномалий в подкоровой части мантии (табл. 4).

### **Зоны активизации континентальных рифтов**

Близкая картина получена при рассмотрении скоростных разрезов верхней мантии под континентальными и океаническими рифтами. На рис. 7, а, б и в табл. 5 представлены авторские и взятые из литературы модели, среди которых рифты на коре океанического типа — только те, которые переходят в континентальные. И здесь отрицательная скоростная аномалия в подкоровой мантии под континентальными рифтами не вызывает сомнений как и ее искажение положительными возмущениями. Эта связь подтверждается локальными разрезами (рис. 7).

**Таблица 5. Различия расчетных и экспериментальных скоростных моделей верхней мантии под альпийскими рифтами по [15]**

Регион	$\Delta V$ , км/с
Красное море, Афар, Эфиопский рифт	0,13
Центр и юг Вост. Африканской рифтовой системы	0,13
Пантелерейский рифт	0,12
Лигурия	0,13
Провинция Бассейнов и Хребтов	0,11
Калифорнийский залив	0,12
Рейнский грабен, Центральный массив Франции	0,13
Байкал	0,11
Рио Гранде	0,14
Момский рифт	0,09
Хребет Гаккеля	0,11

Проведенными исследованиями установлены значительные различия в скоростных разрезах верхней мантии океанических и континентальных рифтов. Это не удивительно, так как мощность земной коры в первом случае много меньше и при адвективном теплопереносе всплывающий астенолит может продвинуться ближе к поверхности. Смещенной оказывается и скоростная аномалия. Под океаническим рифтом нет погружающихся высокоскоростных блоков: под ним отсутствует нижняя основно-гранулитовая часть земной коры, где они могли бы возникнуть.

Как и в случае с зонами активизации геосинклиналей скоростные разрезы под альпийскими рифтами указывают на возможность существования в подкоровой мантии слоя частичного плавления. Его мощность может быть довольно значительной (более 50 км). Данные о глубинах очагов молодого магматизма [11 и др.] приведены в табл. 6. Они согласуются со скоростными аномалиями.

### Задуговые впадины

Мантийный теплоперенос в этих регионах еще недостаточно изучен (их немного, геологическая информация довольно ограничена). Трудно уверенно говорить о наложении современной активизации на некий завершившийся процесс. Возможно, речь идет о последней стадии собственно образования впадин. Но так или иначе — активные события продолжаются в этих регионах и в настоящее время и в их пределах (на периферии) обнаружены месторождения углеводородов.

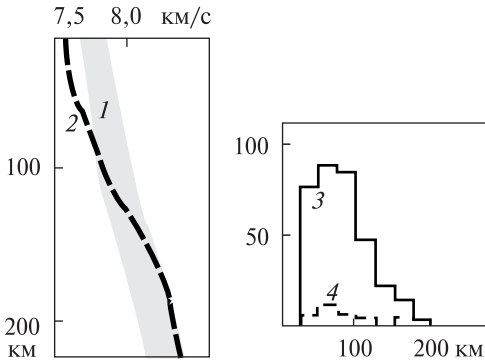
В задуговых бассейнах информации о скоростных разрезах мантии немного [14 и др.]. Годограф, позволяющий построить скоростной разрез для всей верхней мантии, удалось получить только для Филиппинской впадины. Для Беринговоморской, Южно-Охотской и Японской годографы оказались много короче. Различия между экспериментальными и расчетными моделями меньше, чем в рассмотренных выше случаях. Выделить положительные аномалии в локальных разрезах в настоящее время не удастся. Да и их вероятность меньше, чем под рассмотренными выше регионами: процесс утонения коры, ведущий к массовому формированию плотных астенолитов, в этих регионах в основной части бассейна уже завершен [6 и др.]. Проверкой этого утверждения может быть сравнение сейсмичности в подкоровой мантии впадины и островной дуги.

Таблица 6. Глубины очагов молодого и современного магматизма в мантии альпийских рифтов

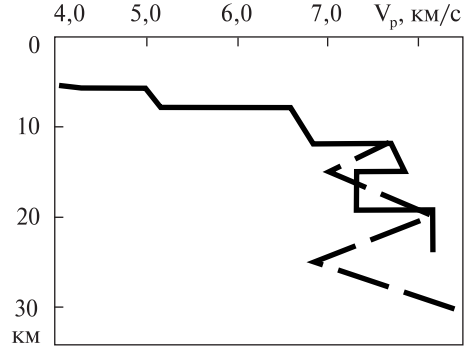
Регион	Глубины очагов, км
Корея	20—65
Внутренняя Монголия	45—70
Юго-восточный Китай	45—70
Эмейшань	70
Тибет	30—70
Тайвань	55—80
Чукотка	50—70
Рио Гранде	50—60

Таблица 7. Глубины кровель магматических очагов под задуговыми впадинами

Регион	Глубина кровли, км
Тирренское море	55—85
Валенсийская впадина	80
Мексиканский залив	50—60
Японское море	40—100
Впадина Лау	60
Море Сулу	50
Филиппинское море	65



**Рис. 8.** Сравнение скоростных разрезов верхней мантии задуговых впадин Пасифики (1) с расчетной моделью по АПГ (2) (а), гистограммы распределения по глубине гипоцентров землетрясений в мантии Камчатки (3) и Охотской впадины (4) (б) [6]



**Рис. 9.** Варианты скоростного разреза под Южно-Охотской впадиной [22]

Землетрясениями также должны сопровождаться движения погружающихся в верхнюю мантию эклогитизированных коровых блоков. Результаты, приведенные на рис. 8, показывают, что высказанное предположение имеет смысл. Возможно, некоторые эклогитизированные блоки в нижней части коры либо самых верхних частях мантии все же фиксируются скоростным разрезом под Южно-Охотской впадиной (рис. 9).

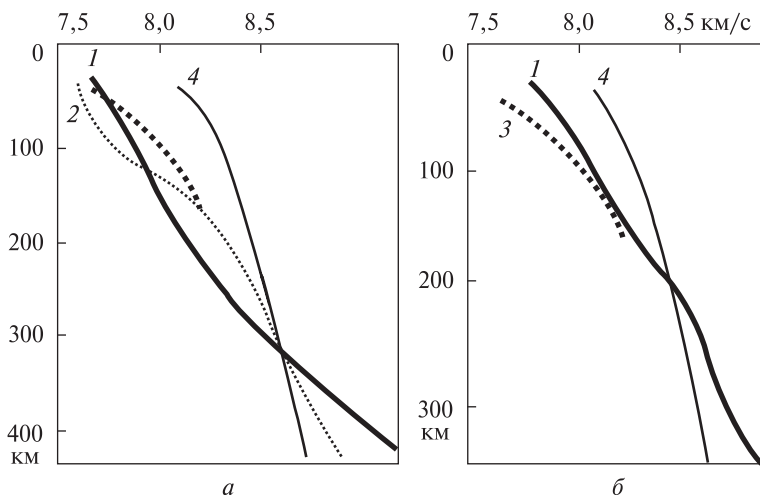
Данных об очагах молодых мантийных эффузивов в задуговых впадинах также получено немного. Они представлены в табл. 7.

Таким образом, и в регионах с этим типом эндогенного режима обнаруживается хорошая согласованность независимых данных скоростных разрезов и определений глубин магматических очагов. В обоих случаях достигается приемлемое соответствие моделям процесса, отвечающим АПГ.

### СОХ и окраины атлантического типа

Согласно АПГ в верхних горизонтах мантии под срединно-океаническими хребтами должна располагаться самая большая по интенсивности и интервалу глубин отрицательная скоростная аномалия. Помехи для ее выделения отсутствуют, так как тонкая океаническая кора не производит опускающихся в мантию высокоскоростных блоков. Построенный авторами скоростной разрез подтверждает сделанный прогноз (рис. 10).

Следует отметить, что достигнутое согласование экспериментального и расчетного скоростных разрезов под СОХ — одно из самых худших среди полученных для структур океанов. Среднее расхождение достигает 0,14 км/с. Возможно, это следствие и сложных условий эксперимента (редкой сети сейсмостанций на хребтах), и неточной схемы тепломассопереноса по АПГ. Последнее связано с ограниченностью геологической информации, не позволяющей четко датировать основные магматические события на СОХ.



**Рис. 10.** Скоростные разрезы верхней мантии СОХ (А) и континентальной окраины атлантического типа (Б): 1 — экспериментальные скоростные разрезы, 2 — расчетный по АПГ скоростной разрез СОХ, 3 — значения  $V_p$  при температуре солидуса, 4 — скоростная модель докембрийской платформы

По скоростному разрезу очевидна обширная зона частичного плавления в верхах мантии хребтов. Ее кровля может располагаться на глубине менее 50 км в настоящее время. Несколько ранее она могла находиться примерно на 70 км (конкретизировать соответствующее время пока не удастся). Сведения о кровлях магматических очагов (табл. 8) не противоречат такому прогнозу.

Средняя скоростная аномалия под переходной зоной атлантического типа прогнозируется по АПГ небольшой. Причем может оказаться существенно различной на разных расстояниях от континента. В целом, такая информация не противоречит экспериментальным данным (рис. 10, б).

### Дополнительная информация

При изучении современной активизации на территории Украины кроме описанных выше методов использовались и другие, характеризующие подкоровую часть процесса. Описание тепломассопереноса в рамках АПГ позволяет предполагать появление специфических зон электропроводности, разуплотнения, выноса в кору гелия с мантийной меткой. Выше они не упоминались прежде всего из-за недостаточной изученности нефтегазоносных частей СА соответствующими методами за пределами Украины. Все же имеет смысл кратко описать уже имеющиеся результаты.

**Глубинная геоэлектрика.** Данные этого метода могли бы служить не менее сильным средством изучения астеносферной линзы, чем сейсмологические. Пока это недостижимо из-за слабой изученности (она практически отсутствует в задуговых впадинах) и проблем с инверсией экспериментальной информации.

Перегрев пород без расплавления и флюидизации не создает ярко выраженных проводников с большой (более 1000 См) величиной суммарной продольной проводимости ( $S$ ). Собственно расплав не обладает особенно низким удельным

Таблица 8. Глубины кровель подкорových магматических очагов под СОХ

Океан	Глубины очагов, км
Тихий	90
Атлантический	25—95
Индийский	25—90
Арктический	45—70

электрическим сопротивлением ( $\rho$ ), оно находится на уровне  $0,7 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ . При содержании магмы около 2 % [5]  $\rho$  сокращается до  $50 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ , суммарная продольная проводимость объекта мощностью  $10\text{—}50 \text{ км}$  —  $200\text{—}1000 \text{ См}$ . Содержание в расплаве флюида (которое может достигать 50 %) увеличивает  $S$  в несколько раз. Однако бо-

лее вероятной представляется миграция флюида в пространство над зоной частичного плавления. Из мантийного объекта флюид в значительной мере уходит с магмой, вторгающейся в кору, способствует быстрой эклогитизации пород.

Принятая модель процесса образования месторождений УВ позволяет прогнозировать две аномалии электропроводности — в коре и верхней мантии. В некоторых нефтегазоносных регионах они установлены: в Балтийской синеклизе — на  $20\text{—}23$  и  $50\text{—}80 \text{ км}$  [7], на Восточной Камчатке — на  $10\text{—}40$  и  $70\text{—}100 \text{ км}$ , в западной части Скифской плиты — на  $10\text{—}30$  и  $40\text{—}100 \text{ км}$ , в центральной части Скифской плиты — на  $15\text{—}20$  и  $80\text{—}100 \text{ км}$  [4], в частях Предкарпатского прогиба — на  $20\text{—}30$  и  $50\text{—}70$  и на  $10\text{—}20$  и  $50\text{—}100 \text{ км}$ , в Припятской впадине — на  $20\text{—}30$  и  $50\text{—}80 \text{ км}$ , в Паннонии — на  $70\text{—}170 \text{ км}$  [4]. К настоящему времени удалось выявить и мантийный проводящий объект под зоной СА Днепровско-Донецкой впадины (ДДВ) на глубинах  $40\text{—}70 \text{ км}$  с величинами  $\rho$  от первых десятков до единиц  $\text{Ом} \cdot \text{м}$  (устное сообщение И.М. Логвинова). В недрах зоны СА Донбасса обнаружены мантийные проводники на глубинах  $50\text{—}90 \text{ км}$  [12]. Они отмечены и в современных рифтогенах Тянь-Шаня и Предкавказья [4 и др.]. Но здесь трудно определить тип эндогенного режима. Зато очевидно, что в обоих случаях активные регионы нефтегазоносны. Установлены проводящие объекты в подкоровой мантии активизированной альпийской геосинклинали Сахалина и рифте Татарского пролива [22].

Единственный изученный проводящий объект в мантии под задуговой впадиной располагается под Охотским морем восточнее Сахалина. Его кровля находится примерно на уровне раздела Мохо, подошва — примерно на  $100 \text{ км}$  глубже, величина  $S$  значительна — несколько тыс. См. Другие авторы также выделяют проводник, но приводят иную глубину подошвы и  $S$  [22].

В целом можно утверждать, что на имеющемся уровне изученности предположение о зонах высокой электропроводности под СА оправдываются.

«Мантийная» гравитационная аномалия. Гравитационный эффект прогнозируемого по АПГ разуплотненного объекта в подкоровой мантии составляет над его центральной частью около  $25 \text{ мГл}$ , на окраине — около  $20 \text{ мГл}$ . Погрешность определения аномалии — примерно  $10 \text{ мГл}$ , т. е. при небольшом увеличении ошибки аномалия становится недостоверной. Выделение этого возмущения требует хорошей изученности скоростного разреза земной коры региона и адекватной методики определения плотности пород по скорости продольных сейсмических волн в них, что достигнуто далеко не во всех зонах СА. В альпийских геосинклиналях и рифтах препятствием для выявления мантийной гравитационной аномалии в «чистом» виде являются возмущения поля, связанные с предшествующими активными процессами.

Расчет аномалии выполняется в виде разницы между наблюдаемым полем и вкладом коры. В активных регионах с циркуляцией флюидов по мощным разло-

мам их эффект попадает в вычисленную указанным образом аномалию, т. к. информация для включения зон разломов в плотностную модель коры, как правило, отсутствует. Расчет показывает, что он может составлять заметную часть аномалии — около 5 мГл (но не имеет отношения к мантийному разуплотненному объекту).

Несмотря на все перечисленные осложнения в платформенных зонах СА удается рассчитать мантийную аномалию, которая хорошо согласуется с другими признаками активизации (в частности — с нефтегазоносностью). С другой стороны, несмотря на очевидность выделения аномалией мантийного источника, она не проливает света на его конкретную глубину и параметры. Формально проинтерпретировать аномалию можно лишь с большой неопределенностью.

Изотопия гелия. Этот параметр (обычно определяемый как  $R = {}^3\text{He}/{}^4\text{He} \cdot 10^8$ ) характеризует меру участия мантийного гелия в опробуемом газе. Мантийный гелий содержит  ${}^3\text{He}$  на три порядка больше корового. Поэтому даже небольшой его вклад в образование изучаемого флюида создает диагностируемый след участия мантийного вещества. В литературе представлены результаты исследований практически всех типов регионов, перечисленных в начале статьи, кроме задуговых впадин [2, 16, 19 и др.]. Они свидетельствуют о присутствии в газах и флюидах месторождений УВ, подземных водах зон современной активизации за пределами нефтегазовых месторождений того или иного количества гелия с мантийной меткой. Наблюдаемые его концентрации не всегда находят объяснение. Например, в газах месторождений ДДВ величины  $R$  не превышают 16 у разломов с инъекцией глубинных флюидов, за их пределами сокращаются до 2—6, т. е. практически не отличаются от корового фона. А в Закарпатском прогибе с очень слабой нефтегазоносностью растут до 350. В умеренно нефтегазоносном Предкарпатском прогибе значения  $R$  коровые, в том числе и у разломов, по которым переносятся глубинные флюиды, создавая аномалии теплового потока. Но сам факт связи процесса с мантийным источником документируется этими данными вполне надежно. Другое дело, что глубина и характер источника аномального для земной коры гелия не описываются.

## **Выводы**

1. В мантии под континентальными и океаническими регионами с месторождениями и проявлениями УВ присутствуют зоны пониженных скоростей продольных сейсмических волн, связанные с высокими температурами и частичным плавлением пород.

2. Величины возмущений в общем согласуются с представлениями АПГ. Однако точная диагностика отрицательных скоростных аномалий в экспериментальных данных затруднена присутствием в том же интервале глубин положительных аномалий, вызываемых погружившимися в мантию блоками эколгитизированных коровых пород.

3. Представления о природе отрицательной скоростной аномалии как об эффекте перегрева верхних горизонтов мантии вплоть до частичного плавления подтверждается информацией о расположении кровель магматических очагов в изучаемых регионах, полученной по составу молодых изверженных пород.

4. Гипотетические высокоскоростные эколгитизированные коровые блоки, опустившиеся в мантию в ходе активизации, по мере остывания верхов мантии и увеличения вязкости и прочности среды останавливаются на разных глубинах

до 200—250 км и могут сохраняться геологически длительное время. В районах с большим выносом мантийных ксенолитов они уверенно выявляются среди перidotитов. Например, под некоторыми районами Сибирской платформы обнаружены эклогиты, треть которых диагностирована в качестве коровых, треть — мантийных, остальные имеют неясную природу [23].

Не вызывает сомнений, что современная активизация (и ее часть — возникновение месторождений углеводородов) включает мантийный этаж. Сформировавшаяся под разделом Мохо астенотинза служит источником энергии и вещества для внутрикоровых процессов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Байдов В.В., Кунин Л.Л. Скорость звука и сжимаемость расплавленных силикатов. *Докл. АН СССР*. 1968. **178**. № 2. С. 337—340.
2. Валяев Б.М., Дрёмин И.С. Изотопно-гелиевые показатели геодинамических обстановок процессов нефтегазообразования и нефтегазоаккумуляции. Материалы 5-КЧ. Москва: ЦГЭ, 2016.
3. Гейко В.С., Цветкова Т.А., Санникова Н.П., Ливанова Л.П., Гейко К.В. Региональная 3-D Р-скоростная структура мантии северо-западной Евразии. *Геофиз. журн.* 1998. № 3. С. 67—91.
4. Геоэлектрическая модель тектоносферы Евразийского складчатого пояса и сопредельных территорий. Ред. В.В. Белявский, С.Н. Кулик. Киев: Знання, 1998. 265 с.
5. Гонтовая Л.И., Гордиенко В.В. Глубинные процессы и геофизические модели мантии Восточной Камчатки и Кроноцкого залива. *Геол. и полезн. ископаемые Мирового океана*. 2006. № 2. С. 107—121.
6. Гонтовая Л.И., Гордиенко В.В., Назарова З.А. О возможной природе глубокофокусного охотоморского землетрясения 24 мая 2013 года. *Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле*. 2017. Вып. 33. № 1. С. 46—57.
7. Гордиенко В.В. Тектоносфера Прибалтики. *Геофиз. журн.* 1993. № 5. С. 16—24.
8. Гордиенко В.В. О природе аномалий скорости распространения продольных сейсмических волн в верхней мантии. *Геофиз. журн.* 2010. № 3. С. 43—63.
9. Гордиенко В.В. Тепловые процессы, геодинамика, месторождения. 2017. 283 с. URL: [https://docs.wixstatic.com/ugd/6d9890\\_090e4a0466b94934b7d7af8c751a70bf.pdf](https://docs.wixstatic.com/ugd/6d9890_090e4a0466b94934b7d7af8c751a70bf.pdf)
10. Гордиенко В.В. О РТ-условиях магматических очагов в мантии Земли. *Геофиз. журн.* 2014. № 6. С. 28—57.
11. Гордиенко В.В., Гордиенко Л.Я. О РТ-условиях в мантийных магматических очагах под Арктическим и другими океанами. *Геол. и полезн. ископ. Мирового океана*. 2014. № 2. С. 52—66.
12. Гордиенко В.В., Гордиенко И.В., Завгородняя О.В. и др. Донбасс (геофизика, глубинные процессы). Київ: Логос, 2015. 159 с.
13. Гордиенко В.В., Гордиенко Л.Я. Скоростная модель верхней мантии под островными дугами и береговыми хребтами Тихого океана. *Геол. и полезн. ископ. Мирового океана*. 2015. № 3. С. 69—81.
14. Гордиенко В.В., Гордиенко Л.Я. Скорости Р-волн в мантии окраинных морей. Материалы 5-КЧ. Москва: ЦГЭ, 2016. С. 6—10.
15. Гордиенко В.В., Гордиенко Л.Я. Скоростные модели верхней мантии континентальных и океанических рифтов. *Геофиз. журн.* 2017. № 6. С. 20—40.
16. Гордиенко В.В., Тарасов В.Н. Современная активизация и изотопия гелия территории Украины. Київ: Знання України, 2001. 102 с.
17. Низкоус И.В., Кислинг Э., Санина И.А. и др. Скоростные свойства литосферы переходной зоны океан-континент в районе Камчатки по данным сейсмической томографии. *Физика Земли*. 2006. № 4. С. 18—29.
18. Петрофизика. Ред. Н.Б. Дортман. т. 1. Москва: Недра, 1992. 391 с.



19. Поляк Б.Г. Тепломассопоток из мантии в главных структурах земной коры. Москва: Наука, 1988. 192 с.
20. Сейсмологические и геотермические исследования в Белоруссии. Минск: Наука и техника, 1985. 137 с.
21. Справочник физических констант. Ред. С. Кларк. Москва: Мир, 1969. 544 с.
22. Тектоносфера Тихоокеанской окраины Азии. / В.В. Гордиенко, А.А. Андреев, С.К. Биккенина и др. Владивосток: ДВО РАН, 1992. 238 с.
23. Уханов А.В., Рябчиков И.Д., Харьков А.Д. Литосферная мантия Якутской кимберлитовой провинции. Москва: Наука, 1988. 288 с.
24. Харитонов О.М., Красовский С.С., Куприенко П.Я. и др. Литосферный трансект Вранча — Южно-Украинская АЭС. *Геофиз. журн.* 1993. № 5. С. 23—31.
25. Яновская Т.Б., Гобаренко В.С., Егорова Т.П. Строение подкоровой литосферы Черноморского бассейна по сейсмологическим данным. *Физика Земли.* 2016. № 1. С. 15—30.
26. Gorbato A., Widiyatoro S., Fukao Y. et al. Singature of remnant slabs in the North Pacific from P-wave tomography. *Geoph. J. Int.* 2000. 142, № 1. P. 27—36.
27. Jiang G., Zhao D., Zhang G. Seismic tomography of the Pacific slab edge under Kamchatka. *Tectonophysics.* 2009. 465. P. 190—203.
28. Pavlenkova G.A., Pavlenkova N.I. Upper mantle structure of Northern Eurasia from peaceful nuclear explosion data. *Tectonophysics.* 2006. 416. P. 33—52.
29. Sobolev S., Zeyen H., Stoll G. et al. Upper mantle temperatures from teleseismic tomography of French Massif Central. *Earth Planet. Sci. Lett.* 1996. 139. P. 147—163.
30. Zaharia B., Enescu B., Radulian M. et al. Determination of the lithospheric structure from Carpathians Arc bend using local data. *Romanian Reports in Physics.* 2009. 61. № 4. P. 748—764.

Статья поступила 26.04.2019

*В.В. Гордієнко, Л.Я. Гордієнко*

#### АСТЕНОСФЕРНІ ЛІНЗИ В МАНТІЇ НАФТОГАЗОНОСНИХ РЕГІОНІВ

Розглянуто експериментальні та розрахункові дані про розподіл швидкості поздовжніх сейсмічних хвиль у верхніх горизонтах мантиї зон сучасної активізації платформ, геосинклиналей (включаючи острівні дуги), континентальних та океанічних рифтів, задюгових западин, континентальних окраїн атлантичного типу. З частиною з них пов'язані родовища чи прояви вуглеводнів. У всіх випадках визначені від'ємні аномалії швидкості, ускладнені локальними додатними. На тих самих глибинах встановлені магматичні осередки. Природа збурень — перегрів і часткове плавлення — підтверджується даними геоелектрики, гравіметрії, аномаліями ізотопії гелію та узгоджується з уявленнями адвекційно-поліморфної гіпотези.

**Ключові слова:** сучасна активізація, аномалії швидкості, магматичні осередки.

*V.V. Gordienko, L.Ya. Gordienko*

#### ASTENOSPHERIC LINZES IN THE MANTLE OF OIL AND GAS-BEARING REGIONS

Experimental and calculated data on the distribution of the velocity of longitudinal seismic waves in the upper horizons of the mantle zones of modern platform activations, geosynclines (including island arcs), continental and oceanic rifts, back-arc basins, continental margins of the Atlantic type are investigated. Some of them are associated with deposits or hydrocarbon manifestations. In all cases, negative speed anomalies were detected, complicated by local positive ones. Magmatic foci were detected at the same depths. The nature of the disturbances — overheating and partial melting — is confirmed by the data of geoelectrometry, gravimetry, and anomalies of helium isotopy and is consistent with the ideas of the advection-polymorphic hypothesis.

**Keywords:** recent activation, velocity anomalies, magmatic chambers.