

Особенности потенциальной сейсмогенной зоны Ингульского и Среднеприднепровского мегаблоков Украинского щита

© А. А. Трипольский, А. В. Фарфуляк, С. В. Мычак, Л. Т. Калюжная, 2013

Институт геофизики НАН Украины, Киев, Украина

Поступила 3 сентября 2012 г.

Представлено членом редколлегии О. Б. Гинтовым

Проаналізовано особливості сейсмогенних зон Інгульського і Середньопридніпровського мегаблоків Українського щита. Виділено декілька невеликих за розмірами сейсмогенних зон, що розрізняються мірою контрастності геолого-геофізичних характеристик земної кори (швидкості поширення сейсмічних хвиль, особливості залягання поверхні поділу М, тепловий потік, аномалії електропровідності).

Special features of seismogenic zone of the Ingul and Middle-Dnieper megablocks of the Ukrainian Shield have been analyzed. Several seismogenic zones with small areas have been subdivided within its limits, which differ by degree of contrast of geological-geophysical characteristics of the Earth's crust (velocity of propagation of seismic waves, special features of M discontinuity occurrence, heat flow, electro-conductivity anomalies).

Введение. В работе [Трипольский и др., 2009] на основе анализа данных о сейсмичности, тектонике, геофизических полях и глубинном строении земной коры Украинского щита (УЩ) в пределах платформенной части Украины выделены возможные сейсмогенные зоны. Исходя из этого, сформулированы рекомендации для выбора местоположения сейсмических станций с целью мониторинга сейсмического режима.

В настоящей работе исследования такого рода продолжены и сконцентрированы в пределах Ингульского и Среднеприднепровского мегаблоков УЩ. По сравнению с остальной частью УЩ эти блоки многосторонне и подробно изучены различными геолого-геофизическими методами.

Задача состоит в том, чтобы, детально проанализировав результаты предыдущих исследований и уточнив некоторые выводы, приведенные в работе [Трипольский и др., 2009], количественно оценить степень или уровень контрастности геолого-геофизических параметров среды в пределах выделенной ранее сейсмогенной зоны по отношению к сопредельным территориям. При сопоставлении с другими сейсмогенными зонами в последующем предоставляется возможность оценить на количественном уровне степень достовер-

ности выделенной той или иной сейсмогенной зоны.

Геолого-геофизическая характеристика района исследований. По отношению к Ингульскому мегаблоку, УЩ разделяется на два сектора с разными разрезами земной коры и морфологией поверхности раздела М. Западный сектор относится к гранит-диоритовому типу, где рельеф поверхности раздела М более дифференцирован, восточный — к гранитному типу, где рельеф поверхности М более спокойный. Западный сектор характеризуется утолщенной корой и повышенными скоростями распространения продольных сейсмических волн. Граница между западным и восточным секторами совпадает с трансрегиональной зоной раздвиг Херсон — Смоленск [Старостенко и др., 2007, 2010; Гинтов, Мычак, 2011в].

В пределах открытой части УЩ эта зона представлена, кроме полосы субмеридиональных разрывов, цепочкой крупных интрузивных массивов магматических и палингено-анатектических гранитоидов — Корсунь-Новомиргородским плутоном габбро-анортозитов и рапакививидных гранитов и Новоукраинским массивом трахитоидных гранитов и монцититов (рис. 1) [Гинтов, Мычак, 2011а].

Геологической особенностью Ингульского мегаблока является аномально большая мощ-

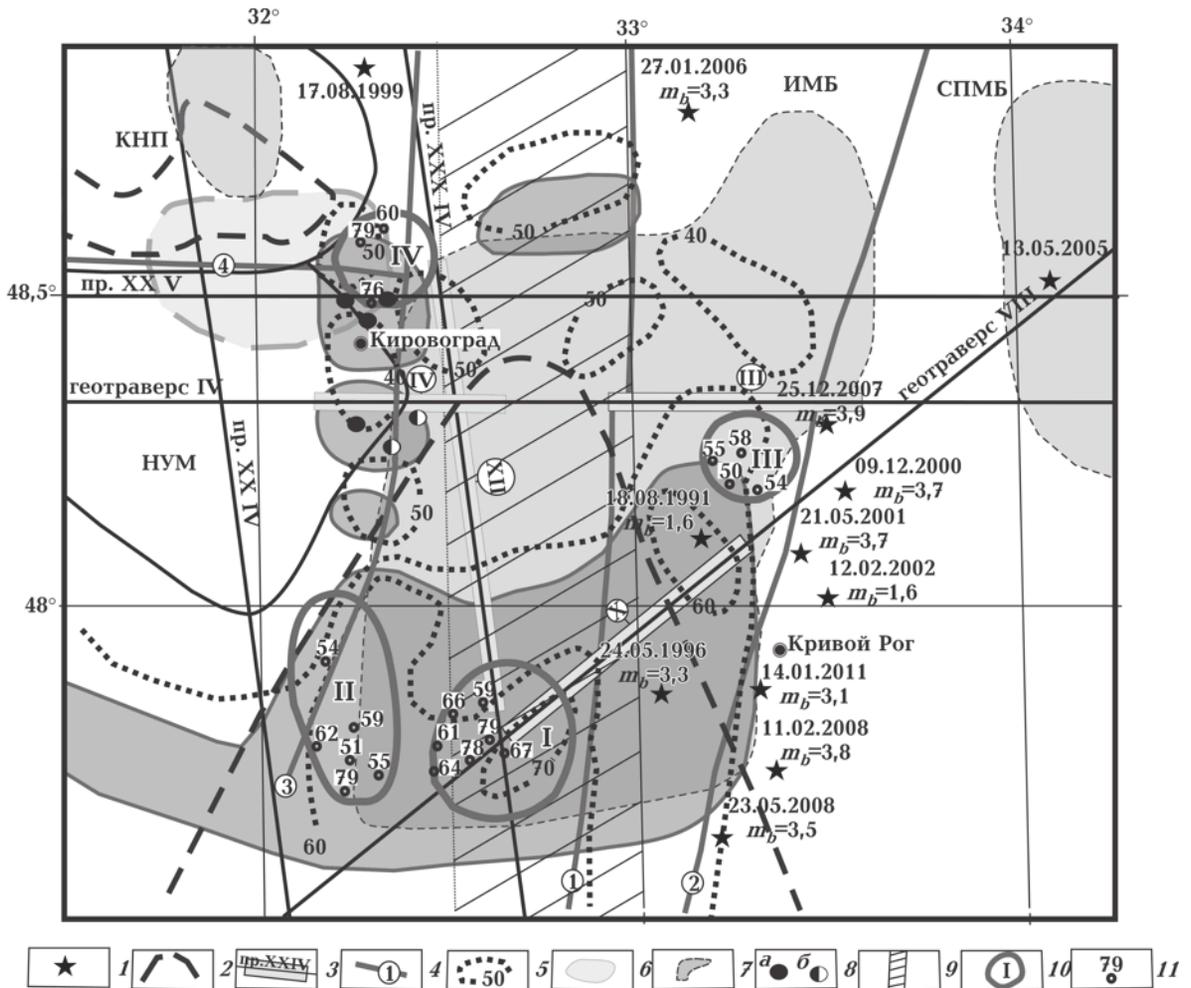


Рис. 1. Геолого-геофизические аномалии Ингульского и Среднеприднепровского мегаблоков УЩ: 1 — сейсмические события, 2 — области с толщиной земной коры менее 40 км, 3 — профили ГСЗ с зонами перепада поверхности раздела М, 4 — зоны разломов (1 — Западно-Ингулецкая, 2 — Криворожско-Кременчугская, 3 — Кировоградская, 4 — Субботско-Мошоринская), 5 — аномалии теплового потока, 6 — гравитационный минимум, 7 — отрицательные значения V_p , 8 — месторождения урана (а), золота (б); 9 — аномалии электропроводности [Гордиенко и др., 2007], 10 — выделенные локальные сейсмогенные зоны, 11 — значения теплового потока, мВт/м². ИМБ — Ингульский мегаблок, СПМБ — Среднеприднепровский мегаблок, КНП — Корсунь-Новомиргородский плутон, НУМ — Новоукраинский массив.

ность «гранитного» слоя (12—16 км), нормальная «диоритового» (14—17 км) и аномально низкая мощность «базальтового» слоя (6—13 км). Мощность коры мегаблока по данным ГСЗ в среднем 41—42 км — это меньше, чем в прилегающих мегаблоках [Щербаков, 2005].

Среднеприднепровский мегаблок расположен между Ингульским мегаблоком на западе и Приазовским на востоке. Согласно данным [Щербаков, 2005], мощность «гранитного» слоя составляет 12 км, «диоритового» — 18 км, что особенно характерно — «базальтовый» слой отсутствует, и «диоритовый» залегает непосредственно на мантии. Разрыв «базальтового» слоя происходил, вероятно,

до формирования «гранитного» слоя и зеленокаменных структур. По-видимому, произошло поддвигание «базальтового» слоя под Приазовский и Ингульский мегаблоки, вследствие чего возникли Криворожско-Кременчугская и Орехово-Павлоградская шовные зоны.

Главные особенности Среднеприднепровского мегаблока — древний возраст, тонкая кора в его центральной части (менее 40 км) и сложная структура поверхности раздела М [Щербаков, 2005]. По сейсмологическим данным [Гейко и др., 2006], мощность сейсмической литосферы мегаблока и прилегающего к нему с запада Ингульского мегаблока со-

ставляет около 300 км, что является средним показателем для УЩ. Скорость в сейсмической литосфере указанных мегаблоков по сравнению с сопредельными блоками самая высокая [Гейко и др., 2006]. В центральной части Среднеприднепровского мегаблока поверхность раздела М представлена линейно-вытянутым в субмеридиональном направлении валообразным поднятием блока глубиной до 32—38 км, ограниченным с востока и запада ровообразными погружениями раздела М до глубины 55 км на западе и 52 км на востоке.

В пределах Ингульского мегаблока рельеф раздела М не столь контрастен (глубина 35—47,5 км), средняя толщина земной коры (40,5 км), что меньше, чем на УЩ в целом (44,6 км) [Омельченко и др., 2008].

По особенностям строения, возрастной последовательности проявления вулканизма, гранитного магматизма, метаморфизма и других эндогенных процессов этот блок имеет определенное сходство с архейским кратоном Слейв на Канадском щите. Для обоих кратонов характерно то, что после стабилизации в архее они не подвергались существенной тектонотермальной переработке в протерозое и фанерозое.

Интенсивность теплового потока в Среднеприднепровском мегаблоке увеличивается от 30 мВт/м² в западной части блока до 45 мВт/м² в восточной. В восточной части Ингульского мегаблока наблюдается его повышение. Вблизи геотраверса VIII между Кировоградской и Западно-Ингулецкой зонами разломов тепловой поток увеличивается до 51—79 мВт/м², что превышает средние значения, характерные для УЩ (44—45 мВт/м²).

Кроме того, в пределах Ингульского мегаблока на протяжении 27 лет проводились тектонофизические исследования, направленные на изучение разломных зон и тектонических процессов в консолидированной коре. В результате этих работ изучены внутреннее строение и кинематика практически всех разрывных структур мегаблока [Гинтов, 2004; 2005; Гинтов, Мычак, 2011б, в].

Образование Ингульского мегаблока началось на рубеже архея и протерозоя процессом сближения Западной (гнейсово-гранулитовой) и Восточной (гранит-зеленокаменной) микроплит. Правосдвиговые перемещения блоков вдоль рассматриваемых зон разломов сопровождалась достаточно сильным сжатием, о чем свидетельствует характер тектонитов и деформации реперных структур. Сближение

происходило под достаточно острым углом (края Западной и Восточной микроплит как бы срезали друг друга), поэтому возникшее в коллизийной зоне региональное поле напряжений распространилось недостаточно далеко, захватив лишь район будущей Голованевской шовной зоны (ГШЗ) в западной части Ингульского мегаблока и Ингулецко-Криворожской шовной зоны (ИКШЗ) в восточной.

После объединения архейского фундамента УЩ в его центральной части начался интенсивный процесс тектонотермальной активизации, вызванный в промежутке 2,1—1,7 млрд лет несколькими фазами раздвига Западной и Восточной микроплит, в течение которых земная кора была прогрета поднимающимся магматическим расплавом, вследствие чего сформировались Новоукраинский массив и Корсунь-Новомиргородский плутон.

Таким образом, архейский фундамент УЩ, как цельная структура, образовался на рубеже AR₃—PR₁-I. Коллизийная зона между Западной и Восточной микроплитами оказалась ослабленной областью, поэтому все последующие тектономагматические процессы протекали в пределах центральной части УЩ.

Западно-Ингулецкая зона разломов (AR₃—PR₁-I) имеет субмеридиональное простирание (357°) и отделяет Среднеприднепровский зеленокаменный пояс с запада. Вблизи нее тогда же была заложена и Искровская зона разломов северо-северо-западного простирания (354°).

В начале раннего протерозоя были заложены **Криворожско-Кременчугская (PR₁-I)** северо-северо-восточного простирания (17°) и Тальновская (западная часть Ингульского мегаблока) зоны разломов, по которым впоследствии центральная часть УЩ в результате вертикальных перемещений обособилась в Ингульский мегаблок. Заложение же этих зон положило начало обособлению ГШЗ и ИКШЗ.

Кировоградская зона разломов (PR₁-II) одна из наиболее широких (до 20 км) зон Ингульского мегаблока. Основное простирание зоны северо-северо-восточное (4°). Она деформирует новоукраинские и кировоградские граниты, возраст которых 2,05—2,0 млрд лет, а время заложения самой зоны — около 1,95 млрд лет.

Процесс формирования **Субботско-Мошоринской зоны разломов (PR₁-II)** относится к последнему этапу деформации УЩ, охватившему весь щит с примыкающими тер-

риториями и приведшему к формированию в его пределах системы крупных разломных зон. Зона разломов вытянута в широтном направлении на 200 км и разделяет Корсунь-Новомиргородский плутон и Новоукраинский массив, деформируя южную часть первого и северную часть второго.

Обзор сейсмических событий по инструментальным данным. Центральная и восточная части УЩ (Ингульский и Среднеприднепровский мегаблоки) относятся к слабоактивным сейсмическим территориям Украины с большим периодом повторяемости ощутимых землетрясений и слабой фоновой сейсмичностью [Пустовитенко и др., 2006; Кульчицкий, Пустовитенко, 2008]. Здесь ведется интенсивная разработка месторождений полезных ископаемых. С этой целью часто применяется метод промышленных взрывов различной мощности, что вызывает колебания земной поверхности, которые вблизи эпицентра ощущаются людьми, а на дальних расстояниях регистрируются сейсмическими станциями как тектонические землетрясения.

За последние годы в пределах Ингульского и Среднеприднепровского мегаблоков произошло двенадцать сейсмических событий с магнитудой от 1,6 до 4,8 (рис. 1, табл. 1).

Рассмотрим некоторые из приведенных в

табл. 1 сейсмических событий района исследований.

24.05.1996 г. (08 ч 59 мин, $M=3,3$, $h_0=33$ км) ближайшая из пяти записавших землетрясение сейсмических станций расположена вблизи г. Киев на эпицентральной расстоянии $\Delta=3,84^\circ$, наиболее удаленная — в Канаде на $\Delta=67,08^\circ$. Погрешность в определении времени возникновения события в очаге (t_0), равная 1,9 с, характеризует и низкую точность вычисленных координат эпицентра.

Большие погрешности в t_0 (3,8 и 2,2 с) и ограниченное число станций ($N=7$), зарегистрировавших землетрясения **21.05.2001 г.** (01 ч 53 мин, $M=3,7$) и **12.02.2002 г.** (12 ч 12 мин, $M=3,7$), в соответствии с координатами, приведенными в различных каталогах (EMSC (European Mediterranean Seismological Centre), ISC (International Seismological Centre)), не позволяют с уверенностью отнести событие к Криворожско-Кременчугской зоне разломов [Кутас и др., 2009].

Очаг землетрясения, которое произошло **9.12.2000 г.** (12 ч 20 мин, $M=3,9$) в районе г. Кривой Рог, расположен в верхней части земной коры на глубине 10 км на расстоянии 3 км от Криворожско-Кременчугской зоны разломов. В каталоге ISC приводятся три варианта расположения его эпицентра.

Координаты различаются по широте на $0,3^\circ$, по долготе — на $0,1\text{--}0,2^\circ$. Это землетрясение зарегистрировано в широком диапазоне расстояний: ближайшая из сейсмических станций (Симферополь) находится на $\Delta=3,37^\circ$, наиболее удаленная — в Канаде на $\Delta=66,68^\circ$.

Очаг землетрясения **25.12.2007 г.**, зарегистрированный станциями Института геофизики (ИГФ) НАН Украины, отнесен к верхним слоям земной коры ($h=10$ км) сложной зоны сочленения разновозрастных и разнонаправленных разрывных нарушений — Криворожско-Кременчугской зоне разломов. Согласно исследованиям, приведенным в работе [Пустовитенко и др., 2010], были предложены очаговые параметры, которые рекомендованы для сейсмологического каталога: $t_0=04$ ч 09 мин 34,8 с; $\varphi=47,990\pm 0,050$; $\lambda=33,540\pm 0,0050$; $h=10\pm 5$ км; $K_p=9,7$; $mb=3,9$; $MLH=3,1$; $MW=3,7$; $I_0=5$ баллов.

14.01.2011 г. неподалеку от г. Кривой Рог произошло очередное зем-

Таблица 1. Каталог сейсмических событий в исследуемом регионе по данным сейсмологического центра Института геофизики НАН Украины и ISC (International Seismological Centre)

Дата	Координаты		Магнитуда		Источник данных
	φ °N	λ °E	mb	ML	
18.08.1991	48,01	33,11	1,6	—	ИГФ
24.05.1996	47,78	33,02	3,3	4,0	ISC
17.08.1999	49,017	32,392	—	—	ИГФ
09.12.2000	48,29	33,50	3,9	3,7	ISC
21.05.2001	48,08	33,63	3,7	3,4	ISC
12.02.2002	48,01	33,52	3,7	3,8	ISC
13.05.2005	48,6273	34,222	—	—	ИГФ
27.01.2006	48,80	33,26	3,3	3,0	ISC
25.12.2007	47,998	33,54	3,7	3,1	ISC
11.02.2008	47,82	33,44	3,8	4,8	ISC (BEO) NEIS* BUC**
23.05.2008	47,73	33,14	3,5	3,4	ISC
14.01.2011	47,85	33,46	3,1	—	ИГФ

Примечание: * — очаг в Германии, ** — очаг в районе Вранча.

летрясение. В результате обработки его записей, полученных цифровыми сейсмическими станциями ИГФ НАН Украины, установлено положение эпицентра $\varphi=48,190$ N; $\lambda=33,310$ E; время в очаге $t_0=05$ ч 03 мин 16,7 с; глубина $h=3\pm 5$ км с учетом наименьших невязок [Кушнир, 2011; Кендзера и др., 2012]. Землетрясение также было зарегистрировано станциями зарубежных сейсмологических центров. В представленных в Интернете электронных каталогах приведены различные данные о положении эпицентра, глубине гипоцентра и времени в очаге. Например, по данным GSRC (геофизическая служба РАН) координаты эпицентра $\varphi=48,200$ N; $\lambda=33,340$ E; $t_0=05$ ч 03 мин 12,6 с, $h=5$ км, $mb=3,9/5$ (по записям 12 станций). Болгарская сейсмологическая служба приводит несколько вариантов положения эпицентра и глубины очага. По записям 11 станций параметров землетрясения: $\varphi=48,070$ N; $\lambda=33,920$ E; $h=30$ км, $ML=4,1$. По записям 18 станций: $\varphi=47,950$ N; $\lambda=33,180$ E; $h=44$ км, $ML=4,0$. Только два сейсмических события 21.05.2001 г. и 25.12.2007 г. из вышеперечисленных авторы работы [Пустовитенко и др., 2010] интерпретируют как тектоническое событие и с уверенностью относят к Криворожско-Кременчужской зоне разломов.

В соответствии с законом повторяемости землетрясений Восточно-Европейской платформы [Ананьин, 1990], только за последние 20 лет на исследуемой территории помимо двух установленных тектонических землетрясений с $MLH=3$ могло произойти еще восемь более слабых с $MLH=2$ и примерно около 40 с $MLH=1$, которые существующая в Украине система наблюдений не способна регистрировать. Такие пропуски землетрясений для слабоактивного региона являются невосполнимой потерей первичной сейсмологической информации, необходимой для адекватной оценки сейсмической опасности и сейсмического риска территории.

Как показано выше, зарегистрировано достаточное количество сейсмических событий разной природы. Однако в связи с отсутствием точных инструментальных сейсмологических данных в исследуемом регионе при выделении потенциальных сейсмогенных зон в настоящей статье использовались геолого-геофизические критерии [Трипольский и др., 2009], которые основываются на большом объеме геологических и геофизических данных.

Геолого-геофизические критерии выделения потенциальных сейсмогенных зон. На

территории Ингульского и Среднеприднепровского мегаблоков выполнено огромное количество геолого-геофизических исследований, в результате чего были детально изучены строение земной коры и геофизические поля этой структуры.

Основным геофизическим методом является глубинное сейсмическое зондирование (ГСЗ). Метод позволяет определять скоростные параметры и мощность земной коры, выделять сейсмические границы и их фрагменты, глубинные разломы, волноводы и осуществлять глубинное тектоническое районирование. Результаты исследований методом ГСЗ использованы в настоящей работе при выделении возможных сейсмогенных зон Ингульского и Среднеприднепровского мегаблоков. С этой целью применялись геолого-геофизические критерии, предложенные в работе [Трипольский и др., 2009], с учетом данных других исследований [Пустовитенко, Кульчицкий, 1991; Борисенко и др., 1992; Трипольский, Шаров 2004; Гордиенко и др., 2005; Кутас и др., 2009]:

- 1) скачкообразное изменение глубины залегания М вдоль геотраверсов ГСЗ;
- 2) утоненная кора;
- 3) наличие активных глубинных разломов и узлов их пересечения;
- 4) отрицательные аномалии поля силы тяжести;
- 5) снижение скоростей распространения сейсмических волн в земной коре и верхней мантии;
- 6) повышение уровня теплового потока;
- 7) повышенный уровень средних градиентов скоростей неотектонических движений земной коры.

Все перечисленные критерии представляют собой геолого-геофизические неоднородности земной коры, которые при вращении Земли вокруг своей оси вызывают, как правило, повышенные напряжения в земной коре. Разрядка таких напряжений может происходить либо в виде медленных (криповых) движений, либо в виде нарушения сплошности среды (землетрясения). Чем контрастнее неоднородности, тем выше вероятность возникновения разрывов. Если же отмечаются пространственные совпадения двух или больше неоднородностей, то вероятность и энергия таких разрывов сильно возрастают.

Рассмотрим некоторые из приведенных критериев на примере исследуемого района.

Скачкообразное изменение глубины залегания раздела М вдоль геотраверсов ГСЗ. На трех участках фиксируются отмеченные изменения толщины земной коры — глубины залегания раздела М (рис. 2).

На участке X (геотраверс VIII) раздел М ступенеобразно погружается от глубины 32,5 км на юго-западе до глубины 51,1 км на северо-востоке. Столь контрастный перепад составляет почти 19 км, что по своей амплитуде уступает лишь району Запорожского срединного массива, где раздел М также ступенеобразно смещается по вертикали от 28 до 52 км.

На участке III (геотраверс IV) в районе Криворожско-Кременчугской зоны разломов раздел М ступенеобразно погружается к востоку от 43 до 53 км. Именно здесь на расстоянии около 20 км от данного геотраверса расположен гипоцентр корового землетрясения, которое произошло 25 декабря 2007 г. Интересно, что гипоцентр пространственно совпадает с точками дифракции, которые наблюдаются в зонах глубинных разломов на

сейсмическом разрезе вдоль геотраверса IV.

Западнее выделяется участок IV, где геотраверс IV пересекает Кировоградскую зону разломов, которая имеет ширину более 25—30 км [Гинтов, 2005]. В пределах этой зоны раздел М ступенеобразно погружается к западу от 37 до 46 км.

В табл. 2 представлены десять наиболее характерных примеров резкого изменения глубины залегания раздела М для УЩ и еще два для Складчатых Карпат и Индийского щита. Как видно, параметры изменяются в значительных пределах, а параметры ΔH и H_2^M/H_1^M — наиболее контрастные (рис. 3).

Утоненная кора. В пределах южной части изучаемой сейсмогенной зоны наблюдается значительное сокращение средней мощности земной коры — 36,6 км, что на 8 км меньше, чем в среднем для УЩ (44,6 км) [Трипольский, Шаров, 2004]. В области, примыкающей к геотраверсу VIII, мощность коры еще меньше — 33—34 км (см. рис. 1). Следует отметить, что в Западно-Квебекской сейсмогенной зоне

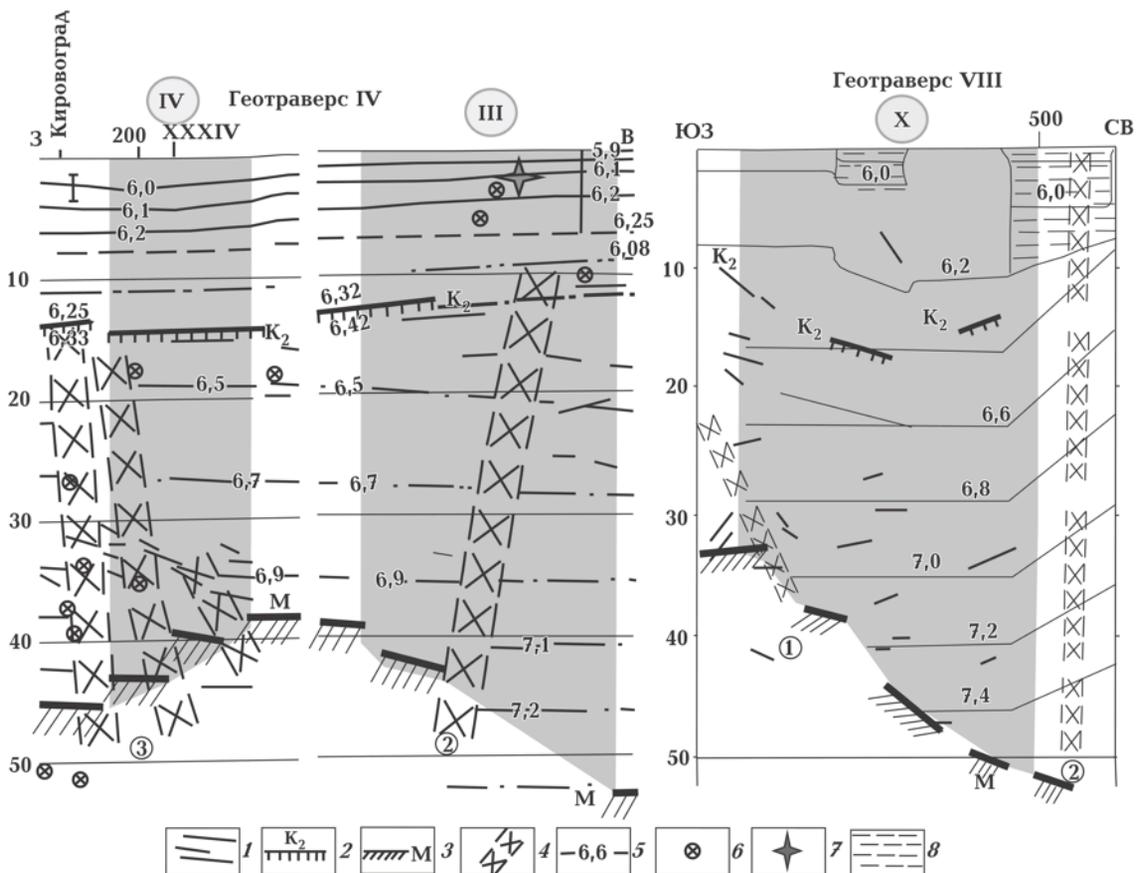


Рис. 2. Участки с резким изменением глубины залегания раздела М [Литосфера..., 1988] III, IV (геотраверс IV), X (геотраверс VIII): 1 — отражающие элементы в земной коре и верхней мантии, 2 — граница K_2 , 3 — граница М, 4 — зоны разломов по данным ГСЗ (цифры в кружках: 1 — Западно-Ингулецкая, 2 — Криворожско-Кременчугская, 3 — Кировоградская), 5 — изолинии скоростей распространения сейсмических волн, км/с, 6 — точки дифракции, 7 — проекция на линию профиля очага землетрясения 25 декабря 2007 г., 8 — зоны уплотнения по данным гравиметрии.

Т а б л и ц а 2. Примеры резкого изменения глубины раздела М в пределах Украинского и Индийского щитов, а также складчатых Карпат

Район	H_1^M	H_2^M	ΔH	Δx	$H_2^M/\Delta H_1^M$	$\Delta H/\Delta X$	α , град
Геотраверс IV, центральная часть Кировоградского разлома УЩ	38,0	45,5	7,5	25	1,20	0,300	17
Геотраверс IV, центральная часть УЩ	42,5	53,0	10,5	25	1,20	0,420	23
Профиль XXXIV, центральная часть УЩ	34,0	44,0	10,0	57	1,29	0,176	10
Геотраверс VII, южная и центральная части УЩ	32,5	51,5	19,0	45	1,58	0,402	22
Геотраверс VI, северо-западная часть УЩ	45,0	55,0	10,0	40	1,22	0,250	14
Геотраверс VI, северо-западная часть УЩ	48,0	56,0	8,0	35	1,17	0,229	13
Геотраверс VI, Складчатые Карпаты	29,5	55,0	25,5	48	1,86	0,503	27
Профиль Кавали—Удили, ИЩ	34,0	37,5	3,5	9	1,10	0,388	21
Геотраверс II, северо-западная часть УЩ	38,5	46,0	7,5	45	1,20	0,167	9
Геотраверс IV, юго-восточная часть УЩ	40,0	46,0	6,0	34	1,15	0,176	10

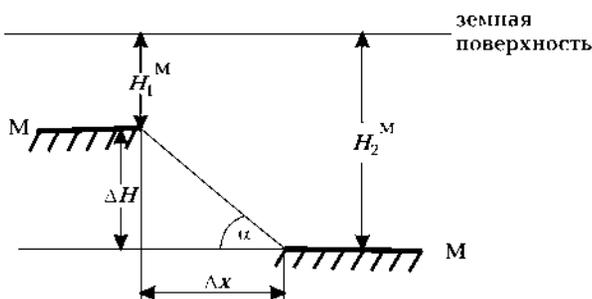


Рис. 3. Резкое изменение глубины раздела М, H_1^M и H_2^M — глубина раздела М в начале и конце участка, км; ΔH — перепад глубин ($H_2^M - H_1^M$), км; Δx — длина участка, км; α — угол наклона условной линии, соединяющей концы участка.

Канадского щита мощность коры составляет 36—38 км [Eaton et al., 2006], причем повышенная концентрация очагов землетрясений фиксируется вблизи изолинии 38 км. Повидимому, по аналогии с Канадским щитом, можно ожидать повышения уровня сейсмичности в данной области.

Снижение скоростей распространения сейсмических волн в земной коре и верхней мантии. Южная часть изучаемой зоны характеризуется пониженными значениями скоростей. С целью количественного изучения степени этого понижения по результатам исследований ГСЗ нами составлены три разных графика $V=f(H)$ (зависимости скорости от глубины) для всей толщи земной коры — от земной поверхности до раздела М (рис. 4).

Сравнение графиков 1, 2 и 3 выявило следующие особенности скоростных аномалий. Разность скоростей ΔV между графиками 1 и 3 достигает максимальной величины на глубине 4 км ($-0,187$ км/с или 3,0 %). Глубже ве-

личина ΔV постепенно снижается до отметки 15 км ($-0,055$ км/с или 0,86 %), а затем возрастает до глубины 36 км ($-0,098$ км/с или 1,4 %). Следовательно, максимальное отклонение ΔV от нормальных значений фиксируется на глубине 4 км.

Сравним графики 2 и 3. Здесь ΔV достигает максимальной величины также на глубине 4 км, но абсолютное значение возрастает более чем в 1,5 раза ($-0,293$ км/с или 4,7 %). Заметим, что для других блоков УЩ отклонение от нормальных значений V в ту или иную сторону, как правило, не превышает 2,5—3,0 %, т. е. в пределах изучаемой зоны фиксируются максимальные для УЩ отклонения скоростей от их нормальных значений. Глубже величина ΔV постепенно уменьшается до отметки 15 км ($-0,078$ км/с или 1,2 %), затем возрастает до глубины 36 км ($\Delta V = -0,210$ км/с или 3,0 %).

Анализ графиков 1—3 показывает, что средние скорости до глубины 36 км (средняя скорость рассчитывается на основании предположения, что в интервале глубин 0—36 км скорость является постоянной) в пределах изучаемой зоны также заметно ниже нормальных значений (вся зона — 6,42 км/с, область, примыкающая к геотраверсу VIII — 6,35 км/с, весь УЩ — 6,52 км/с). Если предположить, что наибольшему отклонению от нормальных скоростей пространственно соответствует повышенная вероятность возникновения землетрясений, то можно заключить, что к глубине около 4 км в будущем могут быть приурочены относительно интенсивные и частые события.

Следует подчеркнуть, что в мировой прак-

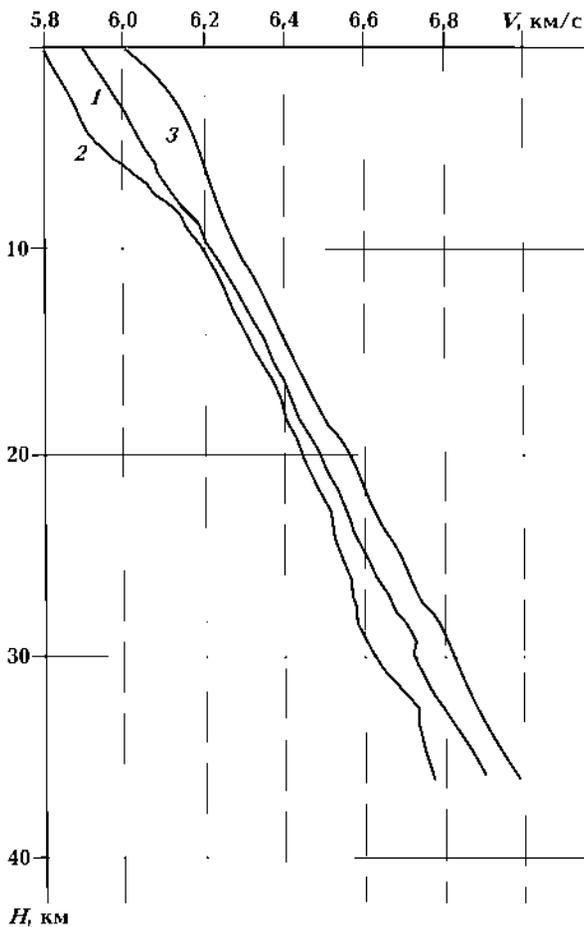


Рис. 4. Графики $V=f(H)$, составленные по результатам исследований ГСЗ на УЩ: 1 — изучаемая сейсмогенная зона, 2 — часть зоны, прилегающая к геотраверсу VIII, 3 — весь Украинский щит (нормальные значения скоростей).

тике известно немало случаев, когда со скоростными неоднородностями земной коры и верхней мантии была связана повышенная сейсмичность.

Повышение уровня теплового потока. В пределах изучаемой территории тепловой поток (ТП) изменяется в значительных пределах — от 34 до 79 мВт/м². При среднем значении на УЩ, равном 44 мВт/м², выделяется несколько участков с положительными аномалиями ТП.

Наиболее контрастной является аномалия, отмеченная в области пересечения профиля ГСЗ XXXIV и геотраверса VIII (см. рис. 1) на площади 8×10 км². Максимальное значение ТП здесь равно 79 мВт/м² при среднем уровне — 75 мВт/м². Западнее (на расстоянии 10—15 км) выделяется аномалия размером 10×15 км², максимум ТП — 66 мВт/м², среднее значение — 63 мВт/м². Еще западнее (на расстоянии 10—30 км) — аномалия размером

15×20 км², максимум ТП — 79 мВт/м², среднее значение — 60 мВт/м².

Таким образом, в западном направлении при снижении контрастности аномалий возрастает их площадь. Первые две аномалии ТП пространственно совпадают с несколькими критериями выделения возможных сейсмогенных зон (см. рис. 1), о чем будет идти речь несколько позднее.

В северной части изучаемой территории отмечено две аномалии ТП. Первая из них площадью 10×15 км² расположена несколько южнее геотраверса IV в 10—15 км к западу от Криворожско-Кременчугской зоны разломов. Максимальное значение ТП — 58 мВт/м², среднее — 53 мВт/м². Вторая площадью 15×15 км² — в области сочленения Новоукраинского массива и Кировоградской зоны разломов. Максимальное значение ТП — 73 мВт/м², среднее — 54 мВт/м².

Обсуждение результатов. Рассмотрение критериев выделения сейсмогенных зон на примере исследуемого региона показало следующее:

- критерии распределены по площади крайне неравномерно;
- в тех случаях, когда удалось установить степень отклонения того или иного геофизического параметра от его нормального значения, оказалось, что эта степень может заметно изменяться от места к месту;
- наблюдается пространственное совпадение двух или более критериев, что может указывать на повышенную вероятность выявления возможных сейсмогенных зон.

Исходя из всего отмеченного, рассмотрим участки, где с той или иной степенью вероятности могут быть выделены сейсмогенные зоны.

Ранее было установлено [Трипольский и др., 2009], что в центральной части УЩ наблюдается пространственное совпадение нескольких критериев: скачкообразное изменение глубины залегания раздела М, область тонкой коры, пониженные значения скорости распространения сейсмических волн в земной коре, повышение уровня ТП [Гордиенко и др., 2002], а также Кировоградская аномалия электропроводности [Гордиенко и др., 2007].

Территория, где совпадают несколько критериев, представляет собой потенциально сейсмогенную зону, различные участки которой неоднородны с позиций оценки контраст-

ности тех или иных критериев по отношению к нормальным (фоновым) значениям различных параметров земной коры. Выполненный нами анализ перечисленных параметров позволил выделить в пределах рассмотренной ранее сейсмогенной зоны четыре небольшие по размерам сейсмогенные зоны, различающиеся степенью контрастности указанных параметров.

Так как аномалии ТП по сравнению с другими критериями являются более контрастными, анализ полученных нами результатов пространственно привяжем к аномалиям ТП.

Локальная сейсмогенная зона I. В области пересечения профиля ГСЗ XXXIV и геотраверса VIII на площади $8 \times 10 \text{ км}^2$ (см. рис. 1) отмечена аномалия ТП (средний уровень — 75 мВт/м^2). Превышение над нормальным уровнем для УЩ (44 мВт/м^2) составляет 77 %. На разрезе по профилю XXXIV глубина раздела М всего 34 км, отклонение от нормальных значений глубины раздела М для УЩ (44,6 км) равно 23,8 %, а на разрезе по геотраверсу VIII (33 км) — 26 %. Кроме того, в области, прилегающей к геотраверсу VIII (по сути, в этом же месте), отклонение скоростей в земной коре от нормальных значений ΔV составляет 1,2—4,7 %, причем максимальное значение (4,7 %) отмечено на глубине 4 км. Заметим, что рассматриваемая область попадает также в пределы Кировоградской аномалии электропроводности и участка повышенной плотности энергоресурсов W (см. рис. 1).

Западнее (расстояние 10—15 км) прослежена еще одна, менее контрастная аномалия ТП (средний уровень — 63 мВт/м^2 , превышение над нормальным — 44 %). В том же направлении плавно снижается отклонение ТП от нормальных значений, а также глубины раздела М и скоростных параметров земной коры.

Эти аномалии ТП небольших размеров можно объединить в одну (средний уровень — 68 мВт/м^2 , превышение над нормальным — 55 %) и назвать локальной сейсмогенной зоной, характеризующейся большим набором критериев и значительной их контрастностью. Контуры зоны в настоящее время не могут быть однозначно и четко указаны из-за недостаточной и неравномерной обеспеченности фактическими данными. Особенно это относится к определению ТП и результатам исследований методом ГСЗ.

Локальная сейсмогенная зона II. Еще западнее (расстояние 10—30 км) выделяется аномалия ТП (средний уровень — 60 мВт/м^2 , превышение над

нормальным — 36 %). Отклонение от нормальных значений глубины раздела М и скоростных параметров земной коры здесь меньше, чем у предыдущей аномалии (см. рис. 1).

Локальная сейсмогенная зона III. Две менее контрастные аномалии ТП регистрируются в северной части района исследований. Первая примыкает с юга к геотраверсу IV и пространственно соотносится с Криворожско-Кременчугской зоной разломов, где раздел М смещен по вертикали на 10 км. Превышение над нормальным уровнем ТП составляет здесь всего 20 % (средний уровень — 53 мВт/м^2). Из других критериев прослеживаются пониженные значения скоростей (см. рис. 1).

Локальная сейсмогенная зона IV. Вторая аномалия ТП (средний уровень — 54 мВт/м^2 , превышение над нормальным — 23 %) отмечена в области сочленения Новоукраинского массива и Кировоградской зоны разломов. В ее пределах расположено несколько месторождений урана. Необходимо подчеркнуть, что к аномалии приурочены западные ограничения области с тонкой корой и пониженными значениями скоростей, что может сопровождаться повышенными горизонтальными градиентами этих характеристик земной коры. Кроме того, в пределах аномалии сильно изменяется характер залегания раздела М. Если на разрезе по геотраверсу IV раздел М, нарушенный Кировоградской зоной разломов, характеризуется опущенным западным крылом, то на разрезе по профилю XXV — опущенным восточным крылом. Следовательно, в месте расположения аномалии ТП — между профилем XXV и геотраверсом IV — происходит значительная перестройка рельефа раздела М, что может влиять на сейсмическую стабильность района (см. рис. 1).

Таким образом, в результате сопоставления и анализа ряда критериев в пределах сейсмогенной зоны [Трипольский и др., 2009] выделены четыре локальные сейсмогенные зоны. Впервые количественно установлена степень отклонения различных геолого-геофизических характеристик среды от их нормальных значений. Ранее указанные отклонения оценивались, как правило, лишь на качественном уровне [Пустовитенко, Кульчицкий, 1991; Трипольский, Шаров, 2004; Сафронов, 2005; Кутас и др., 2006; Кутас и др., 2007].

В будущем предстоит выяснить несколько принципиально важных вопросов.

1. Существует ли причинно-следственная связь между величиной отклонения тех или иных характеристик среды от их нормальных

значений, с одной стороны, и вероятностью (а также интенсивностью) будущих сейсмических событий, с другой.

2. Если такая связь существует, то она реализуется по линейному или каким-то другим законам?

3. Какой из рассмотренных ранее геолого-геофизических критериев наиболее ответственный за выявление возможных сейсмогенных зон, или все критерии равноценны?

4. Можно ли количественно оценить влияние каждого из критериев на повышение вероятности возникновения землетрясения?

Нам представляется, что постепенное и неуклонное приближение к решению поставленных вопросов состоит в накоплении и систематизации фактических данных, полученных в разных геологических ситуациях, анализ и обобщение которых поможет привести к положительному результату.

Список литературы

- Ананьин И. В. Сейсмичность и закономерности проявления землетрясений на Восточно-Европейской платформе и в прилегающих областях: Автореф дис. ... д-ра физ.-мат. наук / ИФЗ РАН. — Москва, 1990. — 66 с.
- Борисенко Л. С., Сафронов О. Н., Пустовитенко Б. Г. Сейсмогенные зоны платформенной части Украины и Азово-Черноморского региона // Геодинамика и сейсмопрогностические исследования на Украине. — Киев, 1992. — С. 31—41.
- Гейко В. С., Шумлянская Л. А., Бугаенко И. В., Заец Л. Н., Цветкова Т. А. Трехмерная модель верхней мантии Украины по временам перехода Р-волн // Геофиз. журн. — 2006. — 28, № 1. — С. 3—16.
- Гинтов О. Б. Зоны разломов Украинского щита. Влияние процессов разломообразования на формирование структуры земной коры // Геофиз. журн. — 2004. — 26, № 3. — С. 2—24.
- Гинтов О. Б. Полевая тектонофизика и ее применение при изучении деформаций земной коры Украины. — Киев: Феникс, 2005. — 568 с.
- Гинтов О. Б., Мычак С. В. Напряженные состояния и деформации земной коры центральной части Ингульского мегаблока по материалам тектонофизического изучения Новоукраинского массива // Геофиз. журн. — 2011а. — 33, № 2. — С. 28—45.
- Гинтов О. Б., Мычак С. В. Геодинамическое развитие Ингульского мегаблока Украинского щита по геолого-геофизическим и тектонофизическим данным. I // Геофиз. журн. — 2011б. — 33, № 3. — С. 102—118.
- Гинтов О. Б., Мычак С. В. Геодинамическое развитие Ингульского мегаблока Украинского щита по геолого-геофизическим и тектонофизическим данным. II // Геофиз. журн. — 2011в. — 33, № 43. — С. 89—99.
- Гордиенко В. В., Гордиенко И. В., Логвинов И. М. Тепловое поле и объекты высокой электропроводности в коре и верхней мантии Украины // Физика Земли. — 2007. — № 4. — С. 28—34.
- Гордиенко В. В., Гордиенко И. В., Завгородняя О. В., Ковачикова С., Логвинов И. М., Тарасов В. М., Усенко О. В. Украинский щит (геофизика, глубинные процессы). — Киев: Корвін пресс, 2005. — 210 с.
- Гордиенко В. В., Завгородняя О. В., Гордиенко И. В., Усенко О. В. Тепловое поле территории Украины. — Киев: Знання, 2002. — 170 с.
- Карта разрывных нарушений и основных линияментов юго-запада СССР (с использованием космических съемок) / Гл. ред. Н. А. Крылов. — 1:1 000 000. — Киев: Мингео СССР, 1988. — 4 л.
- Кендзера А. В., Пигулевский П. И., Щербина С. В., Свистун В. К., Гурова И. Ю., Лесовой Ю. В. Криворожское землетрясение 14 января 2011 года как локальное следствие сейсмотектонических и техногенных процессов // Геодинаміка. — 2012. — № 1. — С. 119—125.

- Кульчицкий В. Е., Пустовитенко Б. Г. Проблемы повышения эффективности сейсмического мониторинга юга Украины // Геофізичні технології прогнозування та моніторингу геологічного середовища: Матер. наук. конф. 6—10 жовтня 2008 р., Львів. — Львів, 2008. — С. 47—48.
- Кутас В. В., Кендзера А. В., Омельченко В. Д., Дрогицкая Г. М., Калитова И. А. Проявление сейсмичности в XVIII—XX вв. и потенциальные сейсмоопасные зоны западной части Украины // Геофиз. журн. — 2006. — **28**, № 4. — С. 2—15.
- Кутас В. В., Омельченко Г. М., Дрогицкая Г. М., Калитова И. А. Криворожское землетрясение 25 декабря 2007 г. // Геофиз. журн. — 2009. — **31**, № 1. — С. 42—52.
- Кутас В. В., Омельченко В. Д., Кендзера А. В., Дрогицкая Г. М., Калитова И. А. Сейсмичность западной части Восточно-Европейской платформы в пределах Украины // Геофиз. журн. — 2007. — **29**, № 5. — С. 59—72.
- Кушнир А. Н. Криворожское землетрясение 14 января 2011 года // Геодинаміка. — 2011. — № 1. — С. 110—115.
- Литосфера центральной и восточной Европы: Геотраверсы IV, VI, VIII / Отв. ред. В. Б. Соллоуб. — Киев: Наук. думка, 1988. — 172 с.
- Омельченко В. Д., Трипольский А. А., Носенко А. Б. Скоростные неоднородности и рельеф раздела Мохоровичича Украинского щита // Геофиз. журн. — 2008. — **30**, № 6. — С. 113—126.
- Пустовитенко Б. Г., Кульчицкий В. Б. Сейсмичность Черноморской впадины // Геофиз. журн. — 1991. — **13**, № 1. — С. 14—19.
- Пустовитенко Б. Г., Кульчицкий В. Е., Пустовитенко А. А. Новые карты общего сейсмического районирования территории Украины. Особенности модели долговременной сейсмической опасности // Геофиз. журн. — 2006. — **28**, № 3. — С. 54—77.
- Пустовитенко Б. Г., Кульчицкий В. Е., Пустовитенко А. А., Скляр А. М. Инструментальные и макросейсмические данные о процессах в очаговой зоне Криворожского землетрясения 25 декабря 2007 года // Геофиз. журн. — 2010. — **32**, № 2. — С. 75—97.
- Сафронов О. М. Сейсмотектонические условия и сейсмическая опасность платформенной части Украины: Автореф. дис. ... канд. геол. наук. — Симферополь, 2005. — 21 с.
- Старостенко В. И., Казанский В. И., Дрогицкая Г. М., Макивчук О. Ф., Попов Н. И., Тарасов Н. Н., Трипольский А. А., Шаров Н. В. Связь поверхностных структур Кировоградского рудного района (Украинский щит) с локальными неоднородностями коры и рельефом Мохо // Геофиз. журн. — 2007. — **29**, № 1. — С. 3—21.
- Старостенко В. И., Казанский В. И., Попов Н. И., Дрогицкая Г. М., Заяц В. Б., Макивчук О. Ф., Трипольский А. А., Чичеров М. В. От поверхностных структур к интегральной глубинной модели Кировоградского рудного района (Украинский щит). 1 // Геофиз. журн. — 2010 — **32**, № 1 — С. 3—33.
- Трипольский А. А., Шаров Н. В. Литосфера докембрийских щитов северного полушария Земли по сейсмическим данным. — Петрозаводск: Изд-во КНЦ РАН, 2004. — 159 с.
- Трипольский А. А., Кендзера А. В., Фарфуляк Л. В., Мычак С. В. Анализ тектонических и геолого-геофизических условий в пределах платформенной части территории Украины с целью размещения сейсмологических станций // Геофиз. журн. — 2009. — **31**, № 5. — С. 115—127.
- Щербаков И. Б. Петрология Украинского щита. — Львов: ЗУКЦ, 2005. — 366 с.
- Eaton D. W., Dineva S., Mereu R. Crustal thickness and V_p/V_s variations in the Grenville orogen (Ontario, Canada) from analysis of teleseismic receiver functions // Tectonophysics. — 2006. — **420**. — P. 223—238.