

Результаты геотермических и геоэлектрических исследований в регионах Ровенской, Хмельницкой и Южно-Украинской АЭС

И.М. Логвинов, И.В. Гордиенко, В.Н. Тарасов, 2020

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

Поступила 27 июля 2020 г.

Основная задача работы заключалась в представлении впервые результатов геотермических и геоэлектрических исследований, полученных в отделе тектоносферы, и сопоставлении их с другими геологическими и геофизическими данными. К сожалению, геотермические данные вблизи всех АЭС скудные. Несмотря на это, можно предположить возможное повышение теплового потока вблизи Хмельницкой АЭС. Такое предположение увязывается с данными о повышенных величинах современных вертикальных движениях земной поверхности. Сопоставление положения АЭС и разломов активных в последние 3 млн лет, показывает, что все АЭС располагаются вблизи Камень-Каширско-Ялтинского разлома. Хмельницкая АЭС находится вблизи пересечения последнего с Хустско-Корецким разломом, а Южно-Украинская — вблизи Ананьевско-Хаджибейского разлома. На основании анализа Каталогов землетрясений, представленных в Сейсмологических бюллетенях Украины за 1999—2016 гг. и международных базах данных о сейсмичности построена карта сейсмичности областей АЭС. Наиболее представительные данные (значительное количество землетрясений) располагаются южнее Хмельницкой АЭС, где они хорошо объясняются наличием Тернопольской аномалии теплового потока. На основании 2D инверсии данных магнитотеллурических исследований построена объемная геоэлектрическая модель территории Украины от 36° до 24° в. д. В земной коре и верхах мантии выделены объекты с сопротивлениями менее $120 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ (ОПС) и блоки пород с сопротивлением более $10\,000 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, которые характеризуют породы с высокой основностью и наименьшей пористостью. Во всех районах рассмотренных АЭС присутствуют ОПС, которые согласуются с разломными зонами, активными последние 3 млн лет. В районах Ровенской и Хмельницкой АЭС ОПС согласуются с участками аномального увеличения средних градиентов скорости неотектонических движений. С точки зрения стабильности земных недр, по совокупности рассмотренных данных наиболее неблагоприятное глубинное строение отмечается в районе Хмельницкой АЭС.

Ключевые слова: тепловой поток, проводимость, сейсмичность, атомные электростанции Украины, современные движения, разломы.

Введение. Одним из важнейших природных катаклизмов, влияние которого необходимо учитывать при проектировке атомных электростанций, являются землетрясения. Все атомные электростанции Украины расположены на юго-западе Восточно-Европейской платформы, либо на Украинском щите, либо на западном его склоне. В работе [Кендзера и др., 2003] указано: «В различных районах мира на

платформах зарегистрировано свыше 40 тыс. землетрясений ...». Исходя из этого, для установления параметров реальной сейсмической опасности в районах расположения атомных электростанций (АЭС) важно иметь комплекс геофизических данных, которые позволят уточнить геотектоническую обстановку вокруг них. Результаты, полученные разными геофизическими методами, используют в качестве

составной части при создании карт детального и общего сейсмического районирования [Пустовитенко и др., 2006; Кутас и др., 2006]. Локальная сейсмичность районов Ровенской, Хмельницкой и Южно-Украинской АЭС изучена слабо. По данным региональной сети сейсмических станций возможные землетрясения здесь могут происходить с магнитудой $M < 3$. Однако, как показывает анализ землетрясений во многих странах, в том числе в Украине (Украинские Карпаты) и Болгарии [Kováčiková et al., 2016, 2019a, б; Srebrov et al., 2018], энергетически слабые землетрясения, расположенные в верхах земной коры, могут создавать значительные сотрясения.

При постановке практически каждой задачи глубинной геологии возникает ситуация, связанная с недостатком информации о геофизических полях. Поэтому основная задача настоящей статьи — впервые представить результаты геотермических и геоэлектрических исследований, полученные в отделе тектоносферы Института геофизики им. С.И. Субботина НАН Украины в районах Ровенской, Хмельницкой и Южно-Украинской АЭС, в сопоставлении их с другими геологическими и геофизическими данными. Такой подход позволяет расширить знания о глубинном строении районов расположения АЭС.

Экспериментальные данные. Сейсмологические и сейсмические данные. На основании анализа Сейсмологического бюллетеня Украины за 1999—2016 гг. [Сейсмологический ... 1999—2016], каталогов землетрясений [U.S. ..., 2020] и диссертационной работы [Сафронов, 2005] были построены карты сейсмичности районов АЭС (рис. 1). Ближайшие землетрясения расположены южнее и юго-западнее Хмельницкой АЭС на расстояниях более 50 км. Здесь зарегистрированы события с $M = 1,6 \div 3,8$ в основном на глубинах, не превышающих 15 км. Время событий достаточно хаотично распределяется от предыдущих до нынешнего века. Еще меньше землетрясений зарегистрировано в районе Южно-Украинской АЭС.

Такое состояние изученности сейсмичности связано с плотностью сейсмических станций на территории Украины, что по-

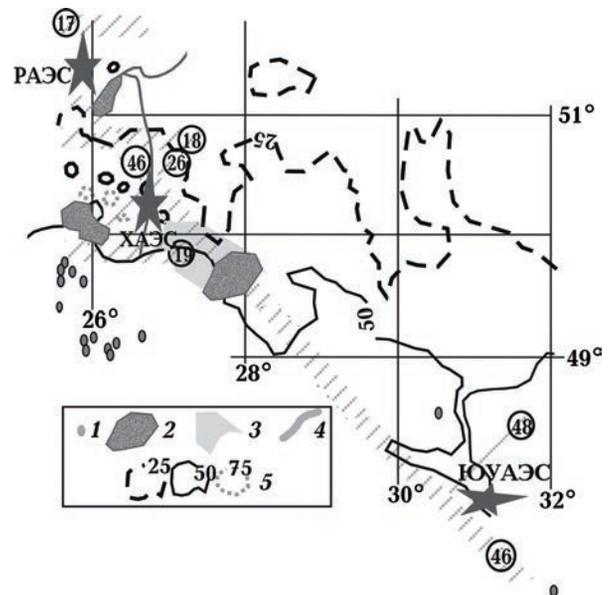


Рис. 1. Сейсмичность районов Ровенской, Хмельницкой и Южно-Украинской АЭС: 1 — эпицентры землетрясений [Сафронов, 2005; Сейсмологический ..., 1999—2016; U.S. ..., 2020]; 2 — положение «источников колебаний низкого энергетического класса» [Кендзера и др., 2003]; 3 — вероятные зоны возникновения очагов землетрясений [Кутас и др., 2006]; 4 — граница Украинского щита по нулевой изогипсе дорифейского фундамента [Атлас ..., 2002]; 5 — суммарные амплитуды (м) позднеплиоцен-четвертичных вертикальных движений земной коры [Верховцев, 2007]. Разломы, активные в последние 3 млн лет [Верховцев, 2007] (цифры в кружках): 17 — Ратновско-Тернянский, 18 — Устлугско-Малинский, 19 — Яворовско-Волчанский, 26 — Хустско-Корецкий, 46 — Камень-Каширско-Ялтинский, 48 — Ананьевско-Хаджибейский.

Fig. 1. Seismicity of the regions of the Rivne, Khmelnytsky, South Ukrainian nuclear power plant: 1 — epicenters of earthquakes [Safronov, 2005; Seismological ..., 1999—2016; U.S. ..., 2020]; 2 — the position of «sources of oscillations of a low energy class» [Kendzera et al., 2003]; 3 — the probable zones of occurrence of the centers of earthquakes [Kutas et al., 2006]; 4 — the border of the Ukrainian Shield along the zero isogypsum of the Doriphean foundation [Atlas ..., 2002]; 5 — total amplitudes (m) of Late Pliocene-Quaternary vertical movements of the Earth's crust [Verkhovtsev, 2007]. Faults active in the last 3 million years [Verkhovtsev, 2007] (figures in circles): 17 — Ratnovsko-Ternyansky, 18 — Ustlug-Malinsky, 19 — Yavorovsko-Volchansky, 26 — Khust-Koretsky, 46 — Stone-Kashirsky-Yalta, 48 — Ananyevsk-Hadzhibey.

зволяет представить сейсмичность районов АЭС только по данным региональной сети сейсмических станций. По данным инструментальных наблюдений, полученных с помощью аналоговых и цифровых станций, установленных в районе ЗАЭС и ХАЭС, были выделены сейсмогенные участки [Кендзера и др., 2003], а на основании сопоставления этих участков с разломной тектоникой область одного из них была расширена [Кутас и др., 2006]. Однако в этих работах нет данных о глубинности выделенных участков.

Разломная тектоника и современные движения. Практика показывает, что эпицентры большинства землетрясений расположены вдоль разломов. Соглашаясь с положениями, изложенными в работе [Миронівська, Мичак, 2006], авторы считают, что выделенные на многих геологических и геофизических картах разломные зоны не имеют четкой привязки к их возрасту образования. Часто на картах разного масштаба разломы показаны немасштабными линиями, а их распространение на глубину не указывается. В то же время геологические и геофизические параметры, определяемые по экспериментальным исследованиям, отражают современное состояние земных недр. В связи с этим сопоставление сейсмичности и полученных геоэлектрических результатов проведено с разломами активными в последние 3 млн лет [Верховцев, 2007].

Обращает на себя внимание, что все АЭС расположены близи Камень-Каширско-Ялтинского разлома. Хмельницкая АЭС находится вблизи пересечения последнего с Хустско-Корецким разломом, а Южно-Украинская — вблизи Ананьевско-Хаджибейского разлома (см. рис. 1).

Еще одним показателем активности процессов в земных недрах являются данные о современных вертикальных движениях земной поверхности. В настоящей статье использованы данные, относящиеся по времени к позднекайнозойско-четвертичным [Кендзера и др., 2003] и позднеплиоцен-четвертичным [Верховцев, 2007]. Приведенные данные хорошо согласуются

для района Хмельницкой АЭС. В районах Ровенской и Южно-Украинской АЭС не наблюдается повышение градиента вертикальных движений по данным [Верховцев, 2007]. Отметим, что повышенные значения вертикальных движений прослеживаются для голоцена в полосе шириной около 50 км, начинающейся от границы Украины с Польшей, с осью, проходящей приблизительно вдоль $50,5^\circ$ с. ш. [Полівцев, 2011].

Указанные геологические признаки активизации должны иметь источники, расположенные в земной коре и мантии. Приведенные ниже геофизические результаты способствуют ответам на этот вопрос.

Геотермические данные. Несмотря на то, что территория Украины является геотермически одной из наиболее изученных в Европе, плотность пунктов определения теплового потока (ТП) в разных регионах Украины различна [Гордиенко и др., 2002, 2005, 2012]. К наименее изученным относятся районы расположения Ровенской, Хмельницкой и Южно-Украинской АЭС, что хорошо видно на картах распределения ТП. Основное обстоятельство, препятствующее развитию этих исследований на УЩ — отсутствие скважин, пригодных для кондиционных измерений температуры. Поэтому приходится использовать малоглубинные скважины, измерения в которых существенно затруднено. Приведенные в настоящей статье значения ТП получены с устранением помех [Гордиенко и др., 2012] (рис. 2).

Ближайшие к Хмельницкой АЭС эпицентры землетрясений расположены по краям Тернопольской аномалии ТП. В районе Ровенской АЭС зафиксированы значения ТП (три пункта), близкие к фоновым. В ряде пунктов, отстоящих на расстоянии 50—60 км от Хмельницкой АЭС, значения ТП превышают 50 мВт/м^2 , приближаясь к значениям, типичным для Черновицкой аномалии ТП. Повышенные значения ТП наблюдаются по краям зоны максимальных амплитуд позднеплиоцен-четвертичных вертикальных движений и аномального увеличения средних градиентов скорости неотектонических движений (см. рис. 2). Для выяснения вопроса о наличии

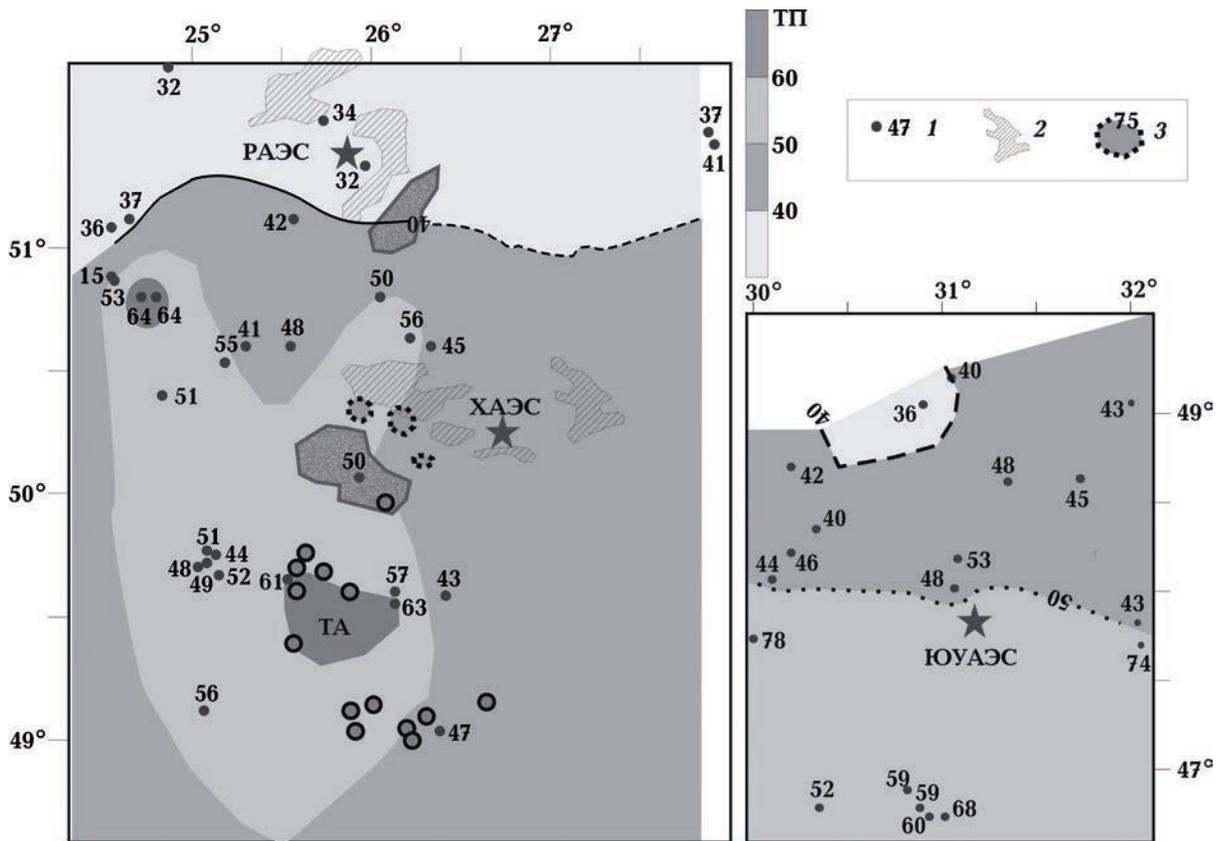


Рис. 2. Пункты определения плотности теплового потока и его значения (1), участки аномального увеличения средних градиентов скорости неотектонических движений земной коры и возможного разуплотнения массивов пород [Кендзера и др., 2003] (2), Остальные обозначения см. на рис. 1.

Fig. 2. The points for determining the heat flux density and TP values are (1), plots of an anomalous increase in average velocity gradients of neotectonic movements of the Earth's crust and possible deconsolidation of rock masses [Kendzera et al., 2003] (2). For other designations see Fig. 1.

аномалии ТП в регионе Хмельницкой АЭС требуются дополнительные экспериментальные данные. В ближайших окрестностях Южно-Украинской АЭС (на расстоянии менее 30 км) имеются всего два пункта определения ТП, значения в которых приближаются к фоновым.

Геоэлектрические данные. На основании анализа данных магнитотеллурических исследований построена объемная геоэлектрическая модель территории Украины от 36 до 24° в. д. [Logvinov, Tarasov, 2018; Логвинов, Тарасов, 2019]. Определение геоэлектрических параметров было выполнено с помощью 2D инверсии вдоль широтных и меридиональных профилей (рис. 3) с использованием шести интер-

претационных параметров — кривых магнитотеллурического зондирования и вертикальных переходных магнитных функций. Интерпретационные параметры были определены в диапазоне периодов от 4—9 до 1600—2500 с. Шаг по горизонтали на интерпретационных профилях изменялся от 3 до 10 км в зависимости от плотности пунктов наблюдений вариаций магнитотеллурического поля. Такой диапазон периодов и длина интерпретационных профилей позволили построить глубинные разрезы сопротивлений (ρ) до 80—100 км. Плотность интерпретационных профилей дает возможность использовать горизонтальный масштаб выполненных построений порядка 1 : 1 500 000.

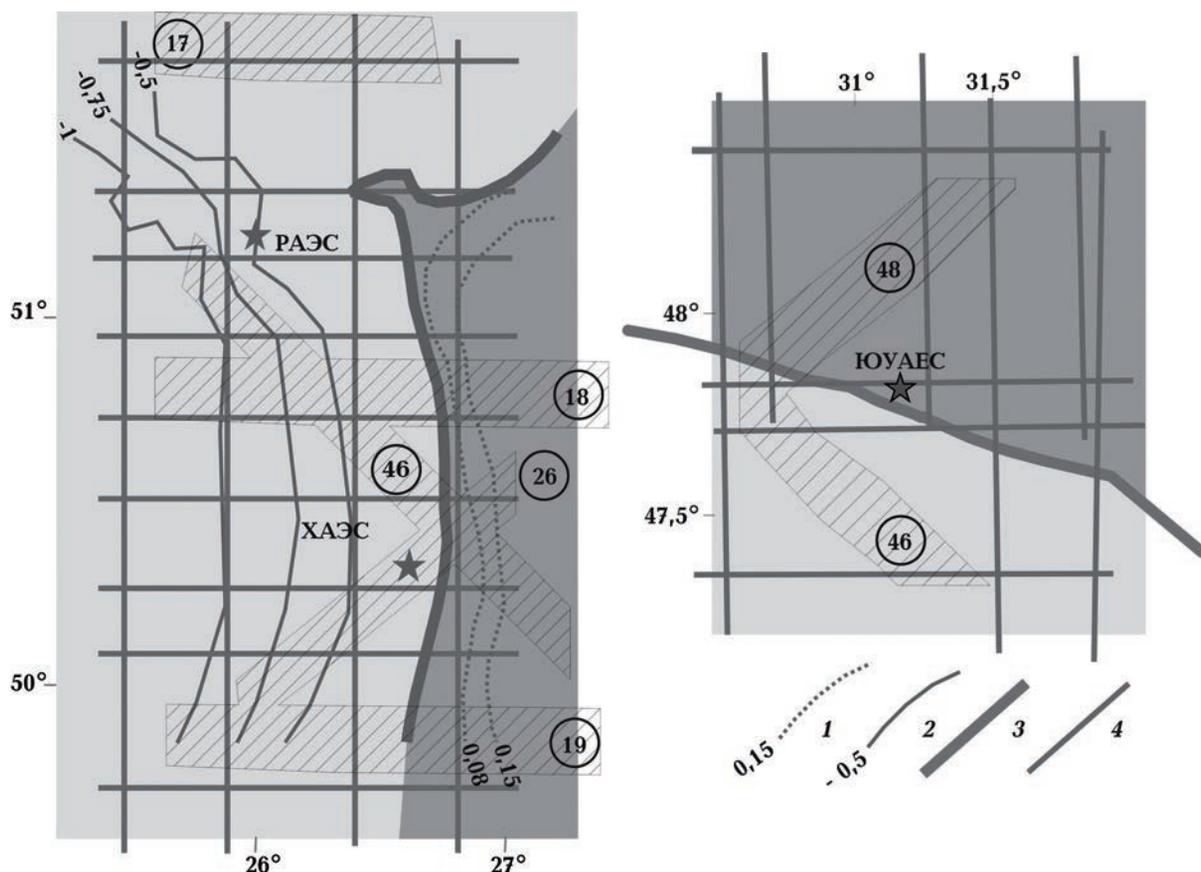


Рис. 3. Расположения профилей геоэлектрического моделирования в районах Ровенской, Хмельницкой [Логвинов, Тарасов, 2019] и Южно-Украинской АЭС [Logvinov, Tarasov, 2018]: 1, 2 — изогипсы осадков на Украинском щите (1) и Вольно-Подольской плите (2); 3 — нулевая изолиния мощности рифейских пород. Остальные обозначения см. на рис. 1.

Fig. 3. Locations of geoelectric modeling profiles in the regions of the Rivne, Khmelnytsky [Logvinov, Tarasov, 2019] and South Ukrainian nuclear power plants [Logvinov, Tarasov, 2018]: 1, 2 — isohypses of precipitation on the Ukrainian Shield (1) and Volyn-Podilsky Plate (2); 3 — zero isoline of the thickness of Riphean rocks. For other designations see Fig. 1.

Геоэлектрические исследования на постоянном и переменном токе и лабораторные измерения показывают, что сопротивление пород, слагающих кристаллический фундамент земной коры и верхнюю мантию до глубины 100—200 км, составляет тысячи и десятки тысяч омметров [Шепель, 2003]. В этом каркасе присутствуют включения, понижающие ρ : породы повышенной пористости, содержащие минерализованную воду; обогащенные рудными минералами графитизированные породы; флюиды и частично расплавленные породы.

Магнитотеллурические зондирования являются по существу индукционными зондированиями. Поэтому на модельных раз-

резах сопротивлений, полученных при 2D инверсии, наиболее достоверно выделяются объекты с сопротивлениями менее $120 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ (объекты пониженного сопротивления (ОПС)), в которых индукция образует заметные аномалии в компонентах магнитотеллурического поля. Кроме того, на представленных срезах на разных глубинах нами выделены блоки пород с сопротивлением более $10\,000 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, которые характеризуют наиболее высокоомные породы (т. е. породы с наименьшей пористостью).

Результаты и обсуждение. Согласно тепловой модели [Гордиенко и др., 2012]: «В районах центральных частей аномалий

ТП (шириной около 20 км) не исключено частичное плавление основных пород гранулитовой фации метаморфизма в нижней части коры (в интервале глубин от примерно 35 км до раздела М). В промежутке между слоями могут сохраниться флюиды (оставшиеся от времени большего плавления коры)».

Авторами были проведены исследования связи сейсмичности Украинских Карпат и территории Болгарии с геоэлектрическими параметрами земной коры [Kováčiková et al., 2016, 2019а, б; Srebrov et al., 2018]. Полученные результаты показали, что преобладающая часть землетрясений происходит вне ОПС. Кроме того, ОПС, как и землетрясения, зачастую пространственно приурочены к зонам разломов. Гипоцентры ближайших к АЭС землетрясений находятся на глубине менее 15 км.

Учитывая эти факты, стоит рассмотреть распределение геоэлектрических параметров в районах расположения АЭС в пределах изученных площадей в верхней части земной коры (рис. 4).

Частотный диапазон геоэлектрических данных, использованных для моделирования, позволяет корректно определять геоэлектрические параметры среды глубже 2 км.

Ровенская и Хмельницкая АЭС находятся на сравнительно малом расстоянии (см. рис. 1) и поэтому имеет смысл проанализировать распределение геоэлектрических параметров на площади, включающей обе АЭС. Ровенская АЭС расположена между Ратновско-Тернянским и Камень-Каширско-Ялтинским разломами, а Хмельницкая — в зоне Хустско-Корецкого разлома и в 20 км от Камень-Каширско-Ялтинского (см. рис. 3). На глубинах менее 3 км Ровенская АЭС располагается над меридиональной зоной ОПС, которая не распространяется на большие глубины. На глубинах до 12—14 км восточнее Ровенской АЭС протягивается ОПС вдоль северного края Устьлугско-Малинского разлома, а на глубинах более 15—16 км выделяется ОПС юго-западнее зоны Камень-Каширско-Ялтинского разлома. Северо-западнее Хмельницкой АЭС

(в 5—27 км) в интервале глубин до 25 км прслеживается серия проводящих объектов, согласующихся с Хустско-Корецким разломом. В интервале глубин 10—20 км Хмельницкая АЭС попадает в область резкого изменения сопротивлений блоков пород. С юго-востока находится блок пород со значениями $\rho > 10^4$ Ом · м, а с северо-запада — со значениями $\rho < 10^2$ Ом · м.

Южно-Украинская АЭС расположена между Ананьевско-Хаджибейским и Камень-Каширско-Ялтинским разломами (рис. 5). Здесь на глубинах более 8 км появляются значительные по площади ОПС.

Природу ОПС можно объяснить, если предположить наличие флюидов, которые просачиваются от источника в верхней мантии по трубам дегазации. Флюиды обеспечивают связность электропроводящих минералов, присутствующих в трубках дегазации, что приводит к возникновению процесса перколяции, который, в свою очередь, приводит к уменьшению сопротивления пород на два порядка и более. Возникновение таких объемов пород с аномально низкими сопротивлениями и вызывает аномальное поведение магнитотеллурического поля, наблюдаемое на поверхности Земли. Процесс поднятия флюидов к поверхности Земли может иметь импульсный характер, чем можно объяснить присутствие ОПС на разных уровнях.

Выводы. Все АЭС располагаются вблизи Камень-Каширско-Ялтинского разлома и сопровождаются вдоль всего его протяжения ОПС.

Объекты пониженного сопротивления в районах Ровенской и Хмельницкой АЭС согласуются с участками аномального увеличения средних градиентов скорости неотектонических движений. В районе Хмельницкой АЭС, кроме отмеченных признаков, возможно наличие повышенного ТП, на что указывают его аномальные значения на некоторых пунктах. В районе Южно-Украинской АЭС не наблюдается аномальных значений вертикальных движений.

Таким образом, по ряду наблюдаемых данных наиболее неблагоприятное, с позиции стабильности земных недр, глубинное

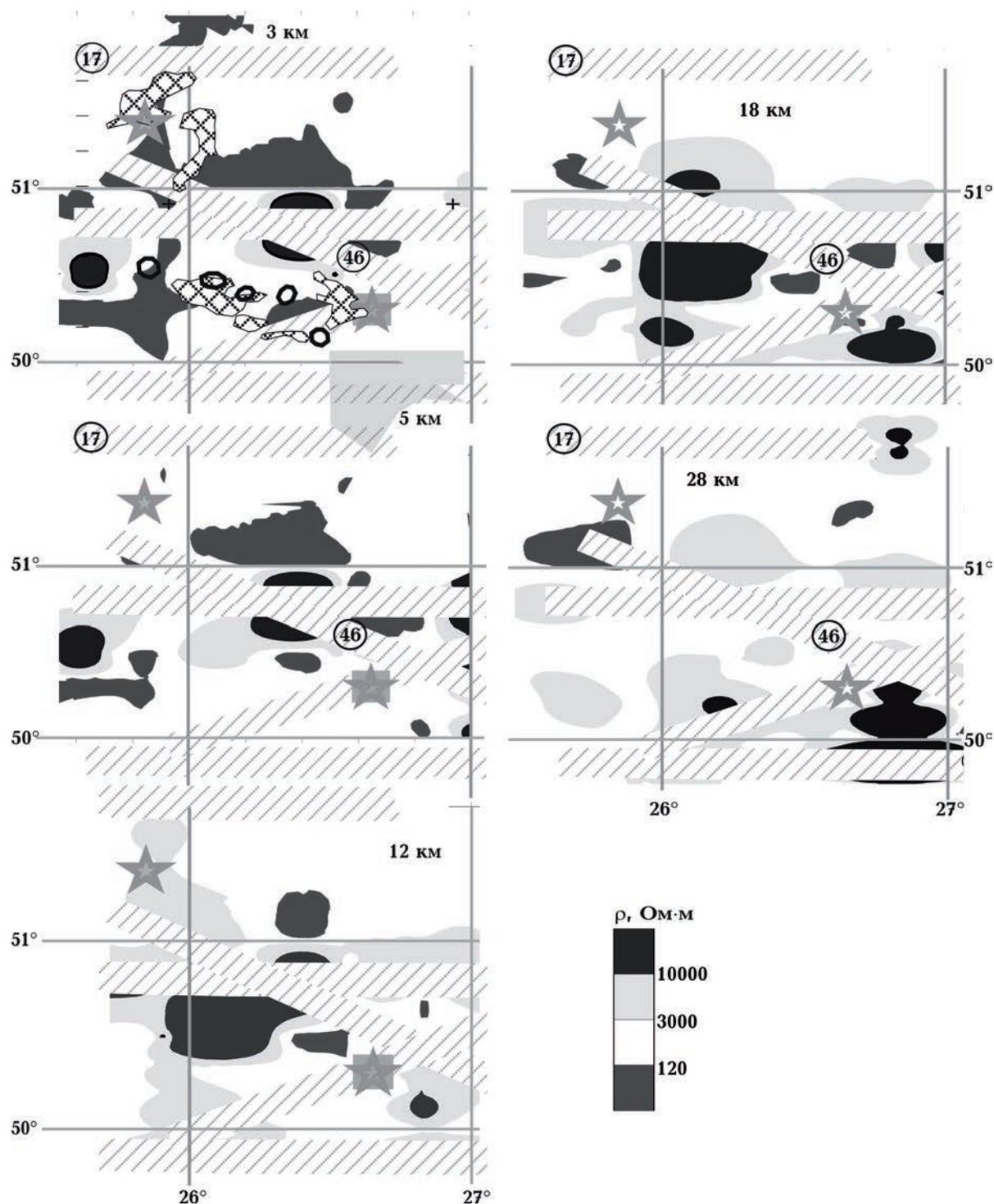


Рис. 4. Разломная тектоника и геоэлектрические неоднородности в регионе расположения Ровенской и Хмельницкой АЭС.

Fig. 4. Fault tectonics and geoelectric heterogeneities in the regions of the Rivne and Khmelnytsky nuclear power plant.

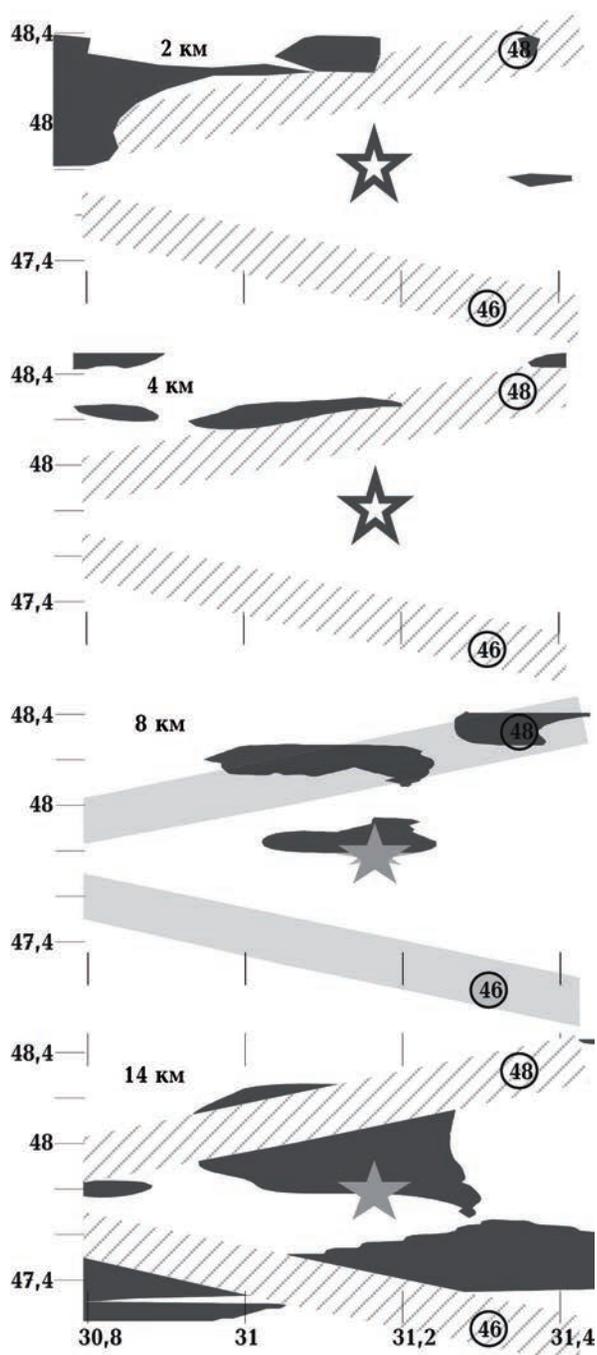


Рис. 5. Разломная тектоника и геоэлектрические неоднородности в регионе расположения Южно-Украинской АЭС.

Fig. 5. Fault tectonics and geoelectric heterogeneities in the regions of the South Ukrainian nuclear power plant.

строение отмечается в районе Хмельницкой АЭС.

Благодарности. Работа была выполнена при поддержке проекта «Мониторинг гео-

физических полей с целью снижения рисков возникновения чрезвычайных ситуаций из-за опасных природных явлений». Благодарим проф. А.В. Кендзера за стимулирование исследований, обсуждение результатов и редактирование рукописи.

Список литературы

Атлас. Глибина будова літосфери та екогеологія України. Ред. М.М. Байсарович, О.Ю. Митропольський, І.С. Чуприна. Київ: Вид. ІГН НАН України, 2002. 55 с.

Верховцев В.Г. Новейшие геоплатформенные структуры Украины и динамика их развития: Дис. ... д-ра геол. наук. Киев, 2007. 423 с.

Гордиенко В.В., Гордиенко И.В., Завгородняя О.В., Ковачикова С., Логвинов И.М., Тарасов В.Н. Вольно-Подольская плита (геофизика, глубинные процессы). Киев: Наук. думка. 2012. 198 с.

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: Корвин пресс, 2005. 210 с.

Гордиенко В.В., Гордиенко И.В., Завгородняя О.В., Усенко О.В. Тепловое поле территории Украины. Киев: Знание, 2002. 170 с.

Кендзера А.В., Омельченко В.Д., Старостенко В.И., Дрогицкая Г.М., Вербицкий С.Т., Палиенко В.П., Спица Р.А. Результаты инструментальных сейсмических исследований в районах Ровенской и Хмельницкой АЭС. *Геофиз. журн.* 2003. Т. 25. № 1. С. 17—27.

Кутас В.В., Кендзера А.В., Омельченко В.Д., Дрогицкая Г.М., Калитова И.А. Проявления сейсмичности в XVIII—XX вв. и потенциально опасные зоны западной части Украины. *Геофиз. журн.* 2006. Т. 28. № 4. С. 3—15.

Логвинов И.М., Тарасов В.Н. Электропроводность коры и мантии Восточно-Европейской платформы в западной части Украины по данным 2D инверсии. *Геофиз. журн.* 2019. Т. 41. № 1. С. 44—75. <https://doi.org/>

- org/10.24028/gzh.0203-3100.v41i1.2019.158863.
- Миронівська Л.В., Мичак С.В. Тектонічне положення вогнищ землетрусів Волино-Поділля. *Геофиз. журн.* 2006. Т. 28. № 6. С. 94—104.
- Полівцев А.В. Карта вертикальних голоценових рухів Волино-Поділля та Передкарпаття. *Геодинаміка.* 2011. № 1(10). С. 58—70.
- Пустовитенко Б.Г., Кульчицкий В.Е., Пустовитенко А.А. Новые карты сейсмического районирования территории Украины. Особенности модели долговременной сейсмической опасности. *Геофиз. журн.* 2006. Т. 28. № 3. С. 54—77.
- Сафронов О.Н. Сейсмотектонические условия и сейсмическая опасность платформенной части Украины. Дис. ... канд. геол. наук. Симферополь, 2005. 135 с.
- Сейсмологический бюллетень Украины за 1999—2016 гг. Севастополь: НПЦ «Экоси-Гидрофизика».
- Шепель С.И. Электрические свойства пород в термобарических условиях литосферы и геоэлектрические модели. Дис. ... д-ра геол. наук. Киев, 2003. 411 с.
- Kováčiková, S., Logvinov, I., Nazarevych, A., Nazarevych, L., Pek, J., Tarasov, V., & Kalenda, P. (2016). Seismic activity and deep conductivity structure of the Eastern Carpathians Stud. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 60(2), 280—296. <https://doi.org/10.1007/s11200-014-0942-y>.
- Kováčiková, S., Logvinov, I., & Tarasov, V. (2019a). The relation of the seismicity in the eastern part of the Ukrainian Carpathian and the distribution of electrical conductivity in the Earth's crust. *Geologica Carpathica*, 70(6), 483—493. doi: 0.2478/geoca-2019-0028.
- Kováčiková, S., Logvinov, I., & Tarasov, V. (2019b). Comparison of the 2-D and Quasi-3-D Geoelectric Models of the Ukrainian Eastern Carpathians and Their Link to the Tectonic Structure. *Tectonics*, 38(11), 3818—3834. <https://doi.org/10.1029/2018TC005311>.
- Logvinov, I.M., & Tarasov, V.N. (2018). Electric resistivity distribution in the Earth's crust and upper mantle for the southern East European Platform and Crimea from area-wide 2D models. *Acta Geophysica*, 66(2), 131—139. <https://doi.org/10.1007/s11600-018-0125-2>.
- Srebrov, B., Logvinov, I., Rakhlin, L., & Kováčiková, S. (2018). Results of the magnetotelluric investigations at geophysical observatories in Bulgaria. *Geophysical Journal International*, 215(1), 165—180. <https://doi.org/10.1093/gji/ggy268>.
- U.S. Geological Survey Earthquake Science Center. (2020). Retrieved from <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>.

The results of geothermal and geoelectric studies in the regions of Rivne, Khmelnytsky and South-Ukraine NPPs

I.M. Logvinov, I.V. Gordienko, V.N. Tarasov, 2020

S.I. Subbotin Institute of Geophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev, Ukraine

The main task of the work was to present for the first time the results of geothermal and geoelectric studies obtained in the tectonosphere department and comparing them with other geological and geophysical data. Unfortunately, geothermal data near all nuclear power plants are scarce. Despite this, a possible increasing of heat flow (HF) near Khmelnytsky NPP can be assumed. Such an assumption is correlated with data on

increased values of modern vertical movements of the Earth's surface. A comparison of the position of nuclear power plants with faults active in past 3 million years shows that all nuclear power plants are located near the Kamen-Kashirsk-Yalta fault. Khmelnytsky NPP is located near the intersection of the latter with the Khust-Koretsky fault, and the South Ukrainian — near the Ananyevsky-Khadzhibeysky fault. Based on the analysis of Earthquake Catalogs presented in the Seismological Bulletins of Ukraine for 1999—2016 and international seismicity databases, a map of the seismicity of nuclear power plant areas has been built. The most representative data (a significant number of earthquakes) are located south of the Khmelnytsky NPP, where they are well explained by the presence of the Ternopol heat flow anomaly. Based on the 2D inversion of magnetotelluric research data, the construction of a volumetric geoelectric model of the territory of Ukraine from 36° to 24° East in the earth's crust and at the top of the mantle, objects with less resistivity than $120 \text{ Ohm} \cdot \text{m}$ (OLR) and blocks of rocks with resistance of more than $10,000 \text{ Ohm} \cdot \text{m}$, which characterize rocks with high basicity and lowest porosity, are distinguished. In all regions of NPPs, there are OLR that are consistent with fault zones active in the last 3 million years. In the regions of the Rivne and Khmelnytsky NPP, the OLR are consistent with areas of an anomalous increase in the average velocity gradients of neotectonic movements. According to the totality of the data reviewed, the most unfavorable, from the point of view of stability of the Earth's interior, deep structure is noted in the area of the Khmelnytsky NPP.

Key words: heat flow, conductivity, seismicity, nuclear power plants of Ukraine, modern movements, faults.

References

- Baysarovich, M.M., Mytropolsky, O.Yu., & Chupryna, I.S. (2002). Atlas. Deep structure of the lithosphere and ecogeology of Ukraine. Kyiv: Publ. of the Institute of Geological Sciences of the National Academy of Sciences of Ukraine, 55 p. (in Ukrainian).
- Verkhovtsev, V.G. (2007). The latest geoplatforms from the structure of Ukraine and the dynamics of their development. *Doctor's thesis*. Kiev (in Russian).
- Gordienko, V.V., Gordienko, I.V., Zavgorodnyaya, O.V., Kovachikova, S., Logvinov, I.M., & Tarasov, V.N. (2012). Volyn-Podolsk Plate (Geophysics, deep processes). Kiev: Naukova Dumka, 193 p. (in Russian).
- Gordienko, V.V., Gordienko, I.V., Zavgorodnyaya, O.V., Kovachikova, S., Logvinov, I.M., & Tarasov, V.N., & Usenko, O. V. (2005). Ukrainian Shield (Geophysics, deep processes). Kiev: Korvin Press, 210 p. (in Russian).
- Gordienko, V.V., Gordienko, I.V., Zavgorodnyaya, O.V., & Usenko, O.V. (2002). Thermal field of Ukraine. Kiev: Znanie, 170 p. (in Russian).
- Kenzera, A.V., Omelchenko, V.D., Starostenko, V.I., Drogitskaya, G.M., Verbitskiy, S.T., Palienko, V.P., & Spitsa, R.A. (2003). Results of instrumental seismic studies in the areas of Rivne and Khmelnytsky NPP. *Geofizicheskiy zhurnal*, 25(1), 17—27 (in Russian).
- Kutas, V.V., Kendzera, A.V., Omelchenko, V.D., Drogitskaya, G.M., & Kalitova, I.A. (2006). Manifestations of seismicity in the XYIII—XX centuries and potentially hazardous areas of western Ukraine. *Geofizicheskiy zhurnal*, 28(4), 3—15 (in Russian).
- Logvinov, I.M., & Tarasov, V.N. (2019). Electrical conductivity of the crust and mantle of the East European Platform in the western part of Ukraine from 2D inversion. *Geofizicheskiy zhurnal*, 41(4), 3—15. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v41i1.2019.158863> (in Russian).
- Myronivska, L.V., & Mychak, S.V. (2006). Tectonic position of Volyn-Podillya earthquake foci. *Geofizicheskiy zhurnal*, 28(6), 94—104 (in Ukrainian).
- Polivtsev, A.V. (2011). Map of vertical Holocene movements of Volyn Podillya and Precarpathians. *Geodynamika*, (1), 58—70 (in Ukrainian).
- Pustovitenko, B.G., Kulchitskiy, V.E., & Pustovitenko, A.A. (2006). New maps of seismic

- zoning of the territory of Ukraine. Features of the long-term seismic hazard model. *Geofizicheskiy zhurnal*, 28(3), 54—77 (in Russian).
- Safronov, O.N. (2005). Seismotectonic conditions and seismic hazard of the platform part of Ukraine. Candidate's thesis. Simferopol, 135 p. (in Russian).
- Seismological Bulletin of Ukraine. (1999—2016). Simferopol: Published by SPC «Ecosi-Hydrophysics» (in Russian).
- Shepel, S.I. (2003). Electrical properties of rocks under thermobaric conditions of the lithosphere and geoelectric models. *Doctor's thesis*. Kiev, 411 p. (in Russian).
- Kováčiková, S., Logvinov, I., Nazarevych, A., Nazarevych, L., Pek, J., Tarasov, V., & Kalenda, P. (2016). Seismic activity and deep conductivity structure of the Eastern Carpathians. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 60(2), 280—296. <https://doi.org/10.1007/s11200-014-0942-y>.
- Kováčiková, S., Logvinov, I., & Tarasov, V. (2019a). The relation of the seismicity in the eastern part of the Ukrainian Carpathian and the distribution of electrical conductivity in the Earth's crust. *Geologica Carpathica*, 70(6), 483—493. doi: 0.2478/geoca-2019-0028.
- Kováčiková, S., Logvinov, I., & Tarasov, V. (2019b). Comparison of the 2-D and Quasi-3-D Geoelectric Models of the Ukrainian Eastern Carpathians and Their Link to the Tectonic Structure. *Tectonics*, 38(11), 3818—3834. <https://doi.org/10.1029/2018TC005311>.
- Logvinov, I.M., & Tarasov, V.N. (2018). Electric resistivity distribution in the Earth's crust and upper mantle for the southern East European Platform and Crimea from area-wide 2D models. *Acta Geophysica*, 66(2), 131—139. <https://doi.org/10.1007/s11600-018-0125-2>.
- Srebrov, B., Logvinov, I., Rakhlin, L., & Kováčiková, S. (2018). Results of the magnetotelluric investigations at geophysical observatories in Bulgaria. *Geophysical Journal International*, 215(1), 165—180. <https://doi.org/10.1093/gji/ggy268>.
- U.S. Geological Survey Earthquake Science Center. (2020). Retrieved from <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>.

Результати геотермічних і геоелектричних досліджень у регіонах Рівненської, Хмельницької та Южно-Української АЕС

І. М. Логвінов, І. В. Гордієнко, В. М. Тарасов, 2020

Інститут геофізики ім. С. І. Субботіна НАН України, Київ, Україна

Основне завдання статті полягало у поданні вперше результатів геотермічних і геоелектричних досліджень, отриманих у відділі тектоносфери, і зіставленні їх з іншими геологічними і геофізичними даними. На жаль, геотермічні дані поблизу всіх АЕС мізерні. Незважаючи на це, можна припустити можливе підвищення теплового потоку поблизу Хмельницької АЕС. Таке припущення узгоджується з даними щодо підвищених величин сучасних вертикальних рухів земної поверхні. Зіставлення положення АЕС і розломів, активних в останні 3 млн років, показало, що всі АЕС розташовано поблизу Камінь-Каширсько-Ятинського розлому. Хмельницька АЕС знаходиться поблизу перетину останнього із Хустсько-Корецьким розломом, а Южно-Українська — поблизу Ананівсько-Хаджибейського розлому. На підставі аналізу Каталогів землетрусів, представлених у Сейсмологічних бюлетенях України за 1999—2016 рр., і міжнародних баз даних щодо сейсмічності побудовано карту сейсмічності районів АЕС. Найпрезентативніші дані (значна кількість землетрусів)

стосуються району південніше Хмельницької АЕС, де вони добре пояснюються наявністю Тернопільської аномалії теплового потоку. На підставі 2D інверсії даних магнітотелуричних досліджень побудовано об'ємну геоелектричну модель території України від 36° до 24° в. д. У земній корі і верхах мантії виділено об'єкти з опорами менше $120 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ (ОПС) і блоки порід з опором понад $10\,000 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, які характеризують породи з високою основністю і найменшою пористістю. В усіх районах розглянутих АЕС наявні ОПС, які узгоджуються з розломними зонами, активними в останні 3 млн років. У районах Рівненської і Хмельницької АЕС ОПС узгоджуються з ділянками аномального збільшення середніх градієнтів швидкості неотектонічних рухів. Щодо стабільності земних надр, за сукупністю розглянутих даних найнесприятливішою є глибинна будова в районі Хмельницької АЕС.

Ключові слова: тепловий потік, провідність, сейсмічність, атомні електростанції України, сучасні рухи, розломи.