

От поверхностных структур к интегральной глубинной модели Кировоградского рудного района (Украинский щит). II

© В. И. Старостенко¹, В. И. Казанский², Н. И. Попов³, Г. М. Дрогицкая¹,
В. Б. Заяц³, О. Ф. Макивчук³, А. А. Трипольский¹, М. В. Чичеров², 2011

¹Институт геофизики НАН Украины, Киев, Украина

²Институт геологии рудных месторождений, петрографии,
минералогии и геохимии РАН, Москва, Россия

³КП "Кировгеология", Киев, Украина

Поступила 4 апреля 2010 г.

Представлено членом редколлегии О. Б. Гинтовым

У статті із залученням численних даних картувального та глибокого розвідувального буріння детально схарактеризовано поверхневі структури Звенигородської зони розломів та умови локалізації у її межах родовищ літію та урану. Викладено методику статистичної обробки даних обмінних хвиль землетрусів і результати сейсмогеологічного моделювання Кіровоградського рудного району. Розглянуто співвідношення внутрішньокорового Кіровоградсько-Новоукраїнського, підкорового Корсунь-Новомиргородського масивів і поділу Мохо.

Surface structures of the Zvenigorod fault zone and conditions of lithium and uranium deposits localization within its limits have been characterized in details attracting the numerous data of structure and deep exploratory drilling. Methods of statistical processing of the data of exchanged waves of earthquakes and results of seismo-geological simulation of the Kirovograd ore area have been stated, correlation of the intracrustal Kirovograd-Novoukrainka massif and the subcrustal Korsun-Novomirgorod massif and the Moho discontinuity have been considered.

Введение. Статья является продолжением двух публикаций в "Геофизическом журнале" о глубинном строении Кировоградского полиметалльного рудного района [Старостенко и др., 2007; 2010]. В первой из них обоснована широкая трактовка его пространственных границ и на основе корреляции геологических и сейсмических данных показана связь месторождений урана, лития и золота с широтным прогибом в рельефе раздела Мохо. Во второй охарактеризована геолого-геофизическая позиция Кировоградского рудного района и его геологическое строение, подчеркнута пространственная и возрастная сопряженность Новоукраинско-Кировоградского гранитоидного и Корсунь-Новомиргородского рапакиви-анортитового массива и сопоставлены условия

локализации метасоматических урановых месторождений в Лелековском, Мичуринском, Новоконстантиновском рудных полях, которые приурочены к Кировоградской зоне разломов и центральной части Новоукраинско-Кировоградского массива.

Статья состоит из двух разделов. В первом рассмотрены геологическое строение Звенигородской зоны разломов и условия локализации в ее пределах месторождений лития и урана. Во втором разделе изложены методика статистической обработки данных МОВЗ и результаты сейсмогеологического моделирования Кировоградского рудного района.

Геологическое строение и рудоносность Звенигородской зоны разломов. В настоящей статье под Звенигородской зоной разло-

мов понимается наиболее рудонасыщенный интервал Звенигородско-Анновской зоны разломов, который расположен между $48^{\circ} 20'$ и $48^{\circ} 40'$ с. ш., примыкает к Новоукраинско-Кировоградскому гранитоидному массиву и находится в пределах той же широтной полосы, в которой сосредоточены урановые месторождения Лелековского, Мичуринского и Новокопачевского рудных полей [Старостенко и др., 2010].

Звенигородская зона разломов, как и Кировоградская, располагается на контакте Новоукраинско-Кировоградского гранитоидного массива со стратифицированной ингуло-ингулецкой серией, но отличается от Кировоградской зоны разломов по строению интрузивно-ультраметаморфического цоколя, морфологии наложенных разрывных структур и металлогении. В металлогеническом отношении главное отличие состоит в присутствии в Звенигородской зоне разломов пегматитовых литиевых месторождений, которые были открыты в конце 1980-х годов и оценены как новый на Украинском щите вид минерального сырья [Нечаев и др., 1991].

Наиболее перспективным из литиевых месторождений считается Полоховское, которое входит в Ватутинское ураново-редкометалльное рудное поле. Три других литиевых месторождения (Липняжское, Надия, Станковатское) образуют Станковатское редкометалльное рудное поле. Все литиевые месторождения перекрыты рыхлыми отложениями мощностью в десятки метров. Приведенные ниже сведения об их геологическом строении и условиях локализации получены в результате буровых работ, выполненных КП "Кировгеология" [Бакаржиев и др., 2005].

Интрузивно-ультраметаморфический цоколь Звенигородской зоны разломов примерно в равном отношении слагают метаморфические породы ингуло-ингулецкой серии и гранитоиды кировоградского комплекса, относящиеся к гранит-мигматитовой формации (рис. 1). Ингуло-ингулецкая серия разделяется на две свиты: россоховскую и каменно-костовацкую [Державна ..., 2001]. Первую слагают биотитовые, биотит-амфиболовые, кордиерит-гранат-биотитовые гнейсы с прослоями амфиболитов, вторую — гнейсы и кристаллические сланцы с гранатом, биотитом, амфиболом, клино- и ортопироксеном. Судя по минеральным ассоциациям, все перечисленные метаморфические породы образовались в температурных границах амфиболи-

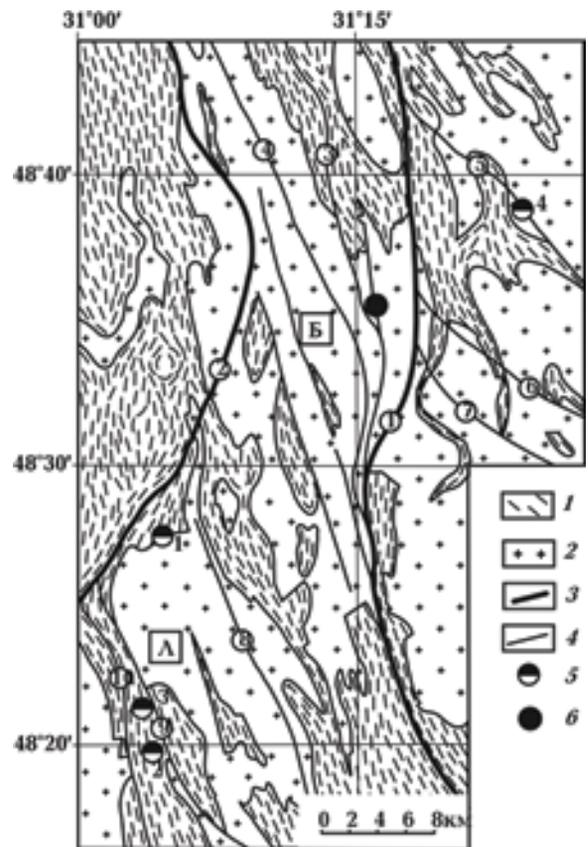


Рис. 1. Схематическая геологическая карта Звенигородской зоны разломов. Составлена по материалам КП "Кировгеология" с использованием государственной геологической карты масштаба 1 : 200 000 [Державна ..., 2001]: 1, 2 — интрузивно-ультраметаморфический цоколь (1 — метаморфические породы ингуло-ингулецкой серии, 2 — гранитоиды кировоградского комплекса); 3, 4 — наложенные структуры (3 — разломы I порядка, 4 — разломы II порядка); 5, 6 — месторождения (5 — лития (1 — Липняжское, 2 — Надия, 3 — Станковатское, 4 — Полоховское), 6 — Ватутинское урановое месторождение). Массивы гранитоидов (буквы в квадратах): Б — Березовский, Л — Липняжский. Разломы (цифры в кружках): 1 — Новопавловский, 2 — Марковский, 3 — Восточно-Курниковский, 4 — Западно-Курниковский, 5 — Копанский, 6 — Хмелевский, 7 — Калиновский, 8 — Добровеличковский, 9 — Маловильшанский, 10 — Станковатский.

товой фации. Гранитоиды кировоградского комплекса буквально пронизывают метаморфические породы и тесно связаны с ними в структурном отношении. Об этом свидетельствуют согласованное изменение морфологии и ориентировки тел гранитоидов и полей метаморфических пород, а также совпадение планпараллельных текстур на контактах тех

и других. Гранитоиды подразделяются на две возрастные группы. К первой группе относятся биотитовые и биотит-мусковит-гранатовые равномернозернистые граниты и мигматиты. Граниты содержат многочисленные ксенолиты и останцы гнейсов ингуло-ингулецкой серии. Нередко в гранитах наблюдаются порфиробласты микроклина, и граниты переходят в порфиробластовые разновидности. Вторую группу образуют аплит-пегматоидные граниты и двуполевошпатовые пегматиты, которые слагают жилы и линзообразные тела, иногда обладающие зональным строением. В этом случае их внутренние части часто сложены пегматоидными гранитами и пегматитами, краевые — аплитами. По данным изотопного датирования по циркону и монациту возрастные границы равномернозернистых и порфиробластовых гранитов оцениваются в 2060 и 2025 млн лет, а пересекающих их аплитовидных гранитов — в 1985 и 1970 млн лет [Щербак и др., 2008].

Согласно распространенной точке зрения гранитоиды образуют купола, а метаморфические породы — межкупольные синклинали. Однако в площадном распределении тех и других пород отражены три направления: доминирующее северо-западное $330\text{—}340^\circ$, северо-западное $310\text{—}320^\circ$ и субмеридиональное. Подчиняясь этим направлениям, гранитоиды образуют линейные тела переменной мощности, которые изгибаются и расщепляются по простиранию, соединяются под острыми и тупыми углами. И лишь отдельные гранитоидные массивы, в том числе Липняжский, соответствуют понятию гранитный купол.

Интрузивно-ультраметаморфический цоколь нарушен многочисленными разломами, которые выполнены милонитами и катаклазитами и сопровождаются регрессивными зеленокаменными изменениями кристаллических пород. В зависимости от масштаба они разделяются на два порядка. К I порядку относятся Новопавловский и Марковский разломы, отстоящие друг от друга на 10—20 км. В совокупности разломы I и II порядка образуют единую систему разрывных структур, которые наследуют и вместе с тем усложняют тектонический план интрузивно-ультраметаморфического цоколя. Новопавловский разлом на южном фланге протягивается в северо-западном $340\text{—}350^\circ$ направлении, затем отклоняется к северо-востоку, пересекает Березовский гранитоидный массив, далее приобретает меридиональное простирание и выхо-

дит в метаморфические породы. В месте изгиба от Новопавловского разлома ответвляются Восточно- и Западно-Курниковский разломы. Морфологически соотношения Новопавловского, Восточно- и Западно-Курниковского разломов соответствуют модели главного сместителя и опережающих его сколовых нарушений. Марковский разлом представляет собой дугу, обращенную выпуклой стороной на восток, и по простиранию пересекает метаморфические породы ингуло-ингулецкой серии и краевую часть Березовского гранитоидного массива. На южном фланге с ним сопряжены северо-западные разломы II порядка: Добровеличковский, Маловильшанский, Станковатский. Они обрамляют Липняжский гранитоидный массив и в сочетании с Марковским разломом соответствуют модели конского хвоста.

Наиболее важные сведения об условиях локализации литиевых месторождений получены в Станковатском рудном поле, которое приурочено к Липняжскому гранитоидному массиву и его метаморфическому обрамлению (рис. 2). В рудном поле кировоградский комплекс представлен гранитами, мигматитами, аплит-пегматоидными гранитами, а также двуполевошпатовыми и редкометалльными пегматитами, метаморфические породы — амфибол-биотитовыми, гранат-биотитовыми, кордиерит-графит-биотитовыми гнейсами и амфиболитами. Граниты слагают центральную часть Липняжского массива и более мелкие тела на его периферии. Они состоят из микроклина (30—50%), олигоклаза (25—30%), биотита (2—5%), кварца (20—30%), граната (1—3%). Акцессорные минералы: апатит, циркон, монацит. Элементы примеси: барий, лантан, иттрий, иттербий. Среди радиоактивных элементов торий преобладает над ураном.

Аплит-пегматоидные граниты и двуполевошпатовые пегматиты, относящиеся ко второй более молодой группе магматических пород кировоградского комплекса, в западном обрамлении Липняжского массива содержат уран-ториевую минерализацию. Она представлена рассеянной вкрапленностью в этих породах уранинита, ураноторианита, коффинита, а также циркона, монацита и касситерита. Судя по набору перечисленных минералов и отсутствию метасоматических изменений вмещающих пород, уран-ториевая минерализация имеет магматическое происхождение.

В отличие от двуполевошпатовых пегматитов, редкометалльные литиеносные пегматиты избирательно приурочены к амфиболитам

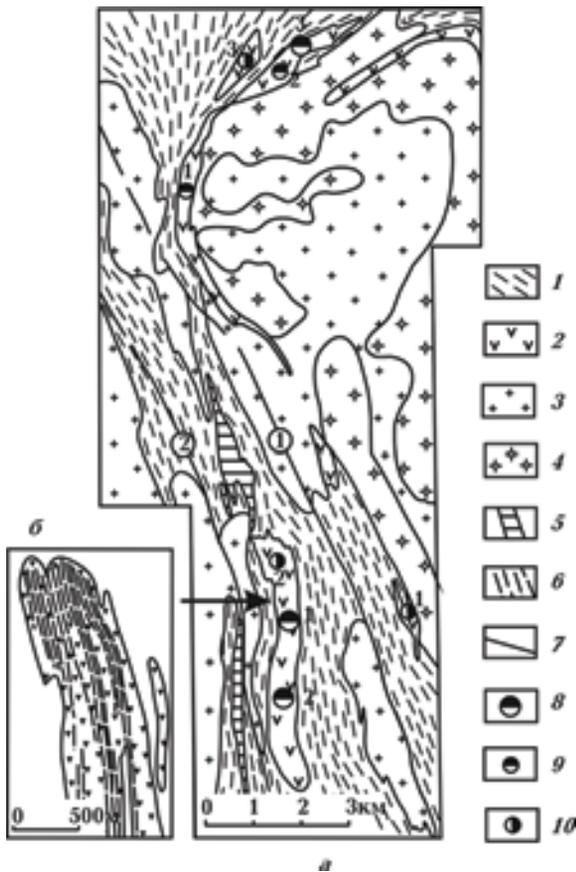


Рис. 2. Схематические геологические карты Станковатского рудного поля (а) и Станковатского пегматитового литиевого месторождения (б): 1, 2 — ингуло-ингулецкая серия (1 — гнейсы, 2 — амфиболиты); 3—5 — кировоградский интрузивный комплекс (3 — биотитовые граниты, 4 — биотитовые мигматиты, 5 — двуполовшатовые пегматиты); 6 — редкометалльные пегматиты; 7 — разломы (1 — Маловильшанский, 2 — Станковатский); 8 — литиевые месторождения (1 — Станковатское, 2 — Надя, 3 — Липняжское); 9 — редкометалльные рудопроявления (1 — Новоодесское, 2 — Скарновое); 10 — рудопроявления золота (1 — Контактное, 2 — Станковатское, 3 — Овражное).

в обрамлении Липняжского массива и подчиняются их внутреннему строению. В северо-западном обрамлении Липняжского массива дугообразная полоса амфиболитов вмещает Липняжское литиевое месторождение и редкометалльные рудопроявления — Новоодесское и Скарновое. Наиболее крупное плитообразное тело амфиболитов протягивается с юга на север на 5,5 км при мощности 600—800 м и содержит месторождения Надя и Станковатское, переходящие друг в друга. Амфиболиты перемежаются с телами метальт-

рабазитов, будинированы и интенсивно рассланцованы. Редкометалльные пегматиты залегают согласно с амфиболитами и метальтрабазитами в виде параллельных даек, падающих на запад под углами 75—80°. Мощность даек колеблется от 2—5 до 20—30 м. В некоторых буровых разрезах вскрыто от 25 до 50 даек. По простиранию пучки сближенных даек протягиваются на 600—800 м. Буровыми скважинами дайки вскрыты на глубину 500 м без признаков выклинивания. На контактах с ними амфиболиты подвержены интенсивной биотитизации, а метальтрабазиты флогопитизации [Иванов та ін., 2000]. Мощность зон изменения колеблется от 0,5 до 5 м. В биотите из этих зон содержание Li_2O составляет в среднем 0,43 %, Rb_2O — 0,38 % и Cs_2O — 0,29 %. По данным изотопного датирования возраст редкометалльных пегматитов оценивается в 2,0—1,97 млрд лет, т. е. он близок к возрасту гранитов кировоградского комплекса.

По минеральному составу литиеносные пегматиты разделяются на микроклин-сподумен-альбитовые, сподумен-микроклин-петалит-альбитовые, микроклин-петалит-альбитовые [Нечаев и др., 2005]. В переменных количествах они содержат реликтовый и новообразованный сподумен, петалит, трифилин, холмквистит, амблигонит. Руды сложены в основном мелкозернистым петалитом и кварцем, которые почти полностью замещают первичный сподумен. При этом продукты замещения не выходят за границы пегматитовых тел. Содержание Li_2O в рудных телах колеблется от 0,345 до 2,23 массовых %, составляя в среднем по Станковатскому месторождению 1,26 %. По данным опробования керн буровых скважин литиевые руды содержат 0,004—0,005 % Та, 0,007—0,008 % Nb и 0,036—0,037 % Ве. Тантал и ниобий присутствуют в виде ферроколумбита. Некоторые дайки обогащены танталом и ниобием вне контуров литиевых руд. Однако вопрос о пространственных соотношениях лития, тантала, ниобия в редкометалльных пегматитах остается открытым.

Некоторые участки Станковатского рудного поля отличаются повышенной золотоносностью. Прерывистые геохимические ореолы золота окаймляют Липняжский массив. Их протяженность меняется от 1 до 7 км при ширине от 0,5 до 1 км. На этом фоне рудопроявления золота локализируются в амфиболитах, окруженных гнейсами и рассеченных пегматитовыми жилами. Рудопроявления контролируются маломощными (первые метры)

зонами катаклаза и трещиноватости, которые наследуют залегание ранее возникшего субстрата, и сопровождаются окварцеванием, серицитизацией и пиритизацией вмещающих пород. При простом жильном выполнении (кварц, кальцит) набор рудных минералов обширен: пирит, арсенопирит, пирротин, халькопирит, леллингит, марказит, молибденит, сфалерит, теллуриды висмута и золота. В отдельных пересечениях содержание золота достигает 9 г/т, но такие пересечения не увязываются между собой. Местами золоторудная минерализация наложена не только на амфиболиты и разнообразные гнейсы, в том числе графитсодержащие, но также на редкометалльные пегматиты, как это установлено на северном фланге Станковатского месторождения. По результатам бурения рудопроявления золота в Станковатском рудном поле получили отрицательную оценку.

Как видно на рис. 2, Маловильшанский и Станковатский разломы пересекают Липняжский гранитоидный массив и его метаморфическое обрамление и пространственно не связаны ни с литиевыми месторождениями, ни с рудопроявлениями золота.

В противоположность редкометалльным пегматитам наложенные на интрузивно-ультраметаморфический цоколь разрывные структуры являются одним из главных факторов локализации ураноносных натровых метасоматитов в Звенигородской зоне разломов. Ватутинское урановое месторождение пространственно связано с Восточно-Курниковским разломом, пересекающим так называемый тонкослоистый горизонт по простиранию и падению (рис. 3, 4). В пределах месторождения Восточно-Курниковский разлом, получивший здесь название Главного западного, резко меняет азимут простирания от 350° до $310\text{—}295^\circ$ и представлен сближенными милонитовыми швами небольшой мощности (0,4—0,8 м) и зонами катаклаза и дробления зеленосланцевой фации. На всем протяжении он следует вдоль дайки ортогнейсов мощностью от 3—5 до 20—30 м. Тонкослоистый горизонт имеет мощность от 250 до 800 м, моноклинально падает в западном направлении под углом от 40 до 60° и состоит из многократно перемежающихся гнейсов, мигматитов, гранитов. Гнейсы представлены биотитовыми, амфибол-биотитовыми, гранат- и графитсодержащими разновидностями. Мигматиты тeneвые и полосчатые, граниты преимущественно равномернозернистые и порфириовидные (порфиробластовые),

близкие к аляскитам с преобладанием калия над натрием. Подчиненное значение имеют пегматоидные граниты и двуполевошпатовые пегматиты.

Главный западный разлом разделяет тонкослоистый горизонт на породы висячего и лежачего боков. Породы висячего бока представлены чередованием гнейсов с мигматитами и гранитами, породы лежачего бока разлома, вмещающие рудные тела, сложены мало мощными слоями тeneвых мигматитов и сланцеватых гранитов при резко подчиненной роли гнейсов. В месте изгиба Главного западного разлома в лежачий бок отходят субмеридиональные разломы более высокого порядка (Восточный, Меридиональный и др.), которые в свою очередь разветвляются и ограничивают клиновидные блоки, насыщенные жилами пегматоидных гранитов и пегматитов. В этих клиновидных блоках и сосредоточены альбититы и урановые руды. Следовательно, во время метасоматоза и уранового рудообразования Главный западный разлом служил экраном для гидротермальных растворов.

Все перечисленные выше породы в той или иной степени диафторированы. Мощность зон диафторитов меняется от нескольких сантиметров до десятков метров. С глубиной его характер не изменяется, однако общая мощность диафторированных пород в подрудной части месторождения заметно уменьшается.

На Ватутинском месторождении щелочные метасоматиты представлены десилицированными породами и альбититами при явном преобладании альбититов. Десилицированные породы сложены микроклином (30—80 %) и альбититом (20—60 %). Из темноцветных минералов характерны хлорит, эпидот, актинолит, рибекит, родусит. В переменных количествах встречается кварц (0—15 %) как реликтовый, так и наложенный. В небольших количествах (1—3 %) присутствуют карбонат, сфен, гематит.

В одних случаях десилицированные породы окаймляют альбититы, в других, наиболее распространенных случаях, многократно перемежаются с ними. Местами они вообще выпадают из метасоматической зональности, вследствие чего эгирин-рибекитовые альбититы непосредственно контактируют с диафторированными и даже неизменными вмещающими кристаллическими породами.

Альбититы в большинстве случаев относятся к эгирин-рибекитовому типу. Подчиненное значение имеют альбититы эпидот-хлоритового типа. В ураноносных альбититах постоян-

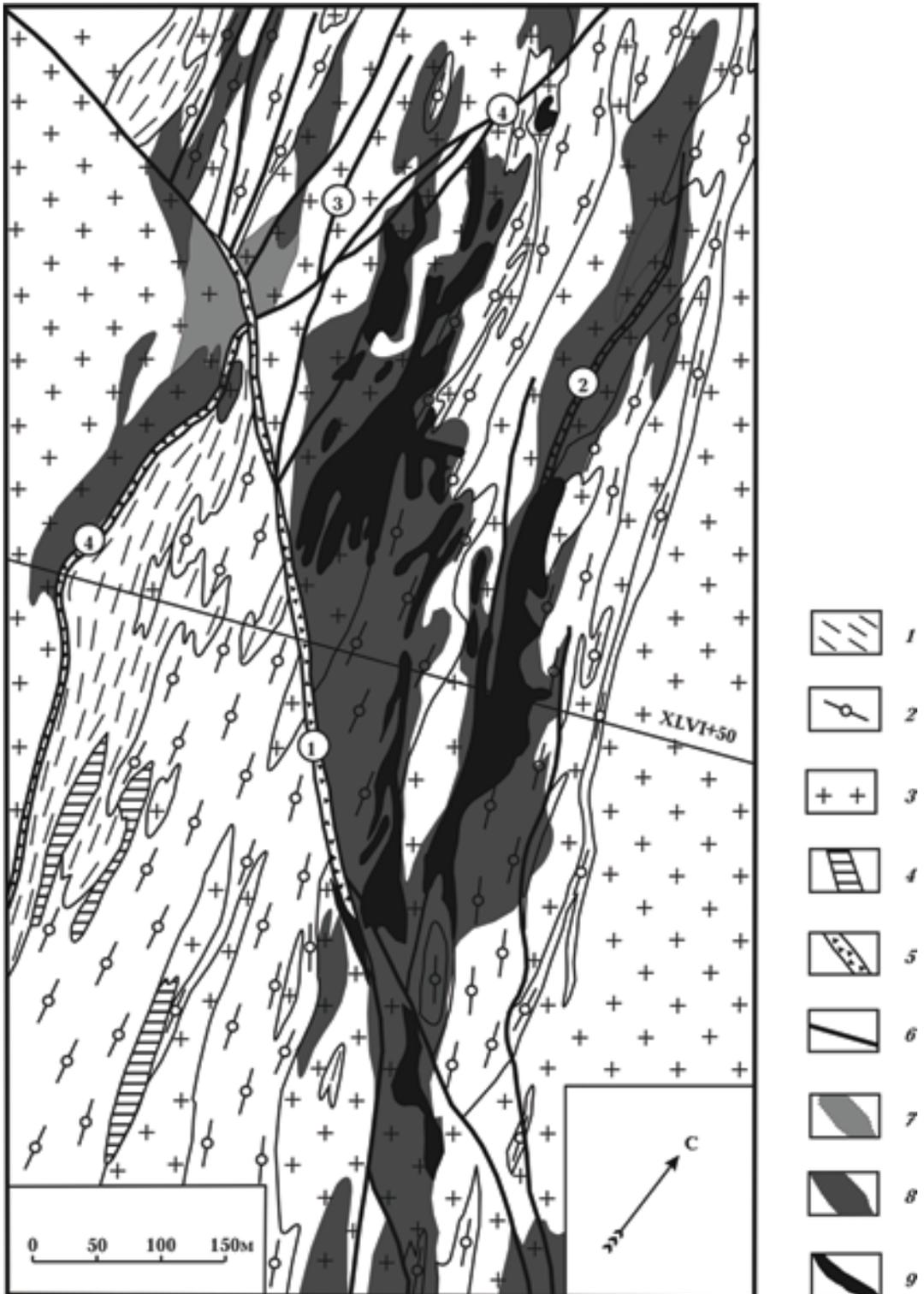


Рис. 3. Геологический план горизонта –115 м Ватутинского уранового месторождения, по [Генетические ..., 1995] с изменениями: 1 — гнейсы; 2 — мигматиты; 3, 4 — граниты (3 — среднезернистые, 4 — пегматоидные); 5, 6 — разрывные нарушения (5 — в масштабе, 6 — вне масштаба); 7, 8 — натровые метасоматиты (7 — десилицированные породы, 8 — альбититы), 9 — рудные тела. Названия разломов (цифры в кружках): 1 — Главный западный, 2 — Восточный, 3 — Меридиональный, 4 — Пологий.

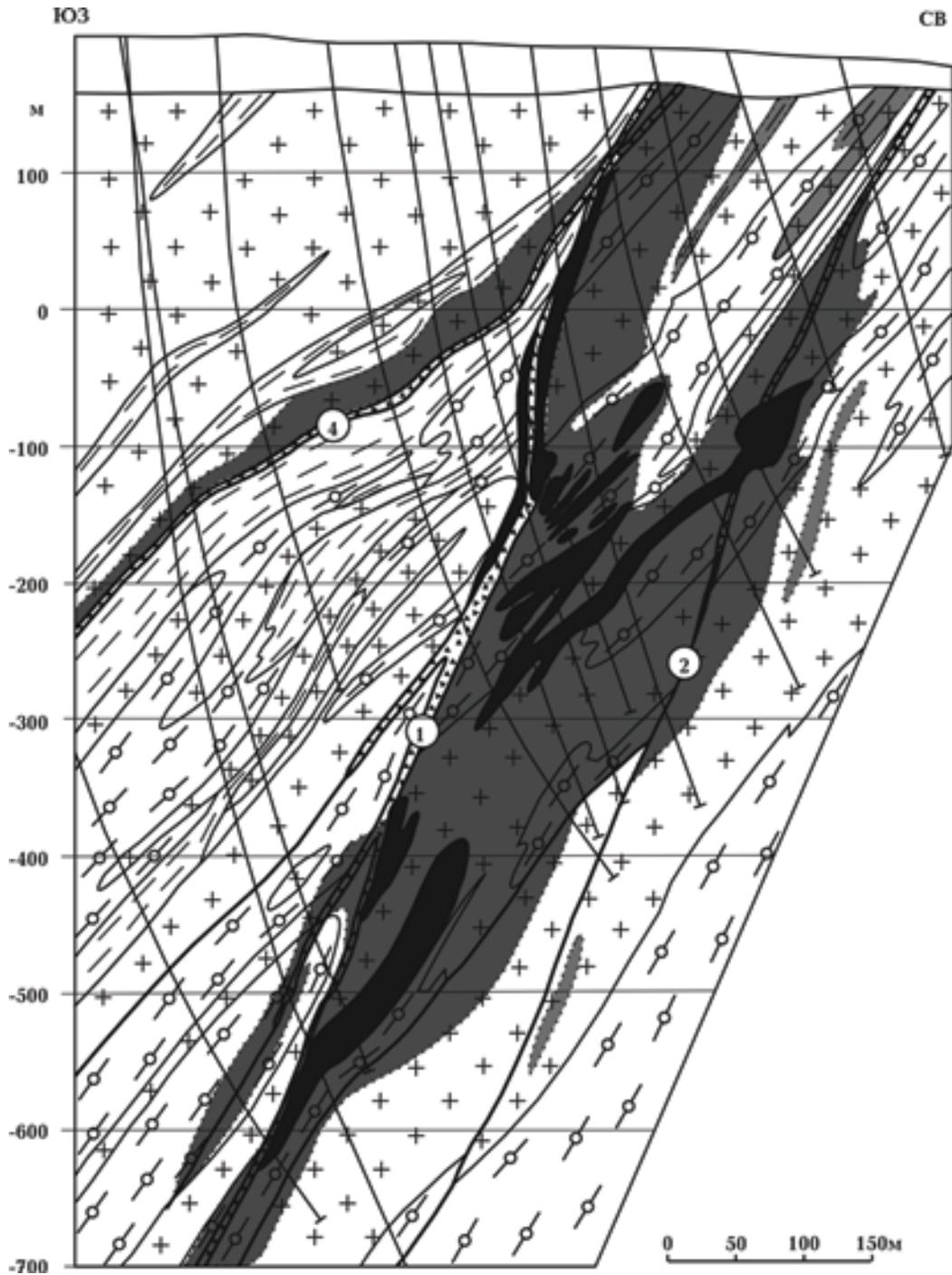


Рис. 4. Геологический разрез Ватуhtинского уранового месторождения по разведочной линии XLVI-50, по [Генетические ..., 1995] с изменениями. Условные обозначения см. на рис. 3.

но присутствуют карбонат, сфен, флогопит, гематит. Урановые минералы представлены уранинитом, настураном, браннеритом и вторичными силикатами урана.

Урановые руды сосредоточены в трех залежах: Восточной, Центральной и Северо-За-

падной. Они имеют северо-западное простирание и юго-западное падение под углами $40\text{--}80^\circ$, согласно в целом с залеганием тонкослоистого горизонта и оперяющих Главный западный разлом разрывных нарушений. Однако отдельные рудные тела имеют более

пологое или крутое падение и соединяются между собой под острыми и тупыми углами.

Ураноносность альбититов в значительной степени зависит от литологического состава исходных пород, в том числе от содержания в них темноцветных минералов. Более высокое содержание урана характерно для альбититов, образованных за счет теневых мигматитов и мезократовых гранитов, в которых темноцветные минералы занимают от 5 до 10 % объема. В лейкократовых апогранитных альбититах на долю темноцветных минералов приходится 1—2 % объема, и они либо вмещают бедные урановые руды, либо вообще безрудны.

В современном эрозионном срезе Ватутинского месторождения вскрыты лишь мелкие рудные тела. Главные рудные тела появляются на глубине 100—120 м. Основная масса урановых руд сконцентрирована на глубине от 200 до 500 м. Суммарная мощность ураноносных альбититов здесь достигает максимальных значений (100—200 м). В интервале 500—800 м мощность альбититов постепенно уменьшается, урановые рудные тела стягиваются в более узкую зону, непосредственно сочленяющуюся с Главным западным разломом. В целом на Ватутинском месторождении вертикальный диапазон распространения урановых руд оценивается в 1,2 км [Генетические ..., 1995].

Изложенные выше данные доказывают сопряженность локальных ураноносных структур с единой системой разломов более высокого порядка, наложенной на интрузивно-ультраметаморфический цоколь. Кроме того, они свидетельствуют о принципиально иных условиях локализации высокотемпературных пегматитовых литиевых месторождений, которые контролируются структурными элементами интрузивно-ультраметаморфического цоколя.

Построение 3D сейсмогеологической модели Кировоградского рудного района. Кировоградский рудный район представляет собой уникальный на древних щитах объект для разработки объемной сейсмогеологической модели на всю мощность коры, включая раздел кора—мантия. Его площадь исследована методами глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ) и обменных волн землетрясений (МОВЗ) по плотной сети профилей широтного и субмеридионального направлений (рис. 5). И те, и другие пересекают Новоукраинско-Кировоградский гранитоидный массив, Корсунь-Новомиргородский рапакиви-анортозитовый массив, Кировоградскую и Звенигородско-Анновскую зоны разломов, а также стратифи-

цированные породы ингуло-ингулецкой серии. Некоторые профили проходят в непосредственной близости от метасоматических урановых месторождений и месторождений лития и золота.

Ранее на основе корреляции геологических данных с материалами ГСЗ была установлена пространственная связь указанных месторождений с широтным прогибом в рельефе раздела Мохо, получившим условное название мантийного рва [Дрогицкая и др., 2007]. Дополнительный анализ данных обменных волн землетрясений позволяет осветить гораздо более широкий круг вопросов о глубинном строении Кировоградского рудного района, о поведении на глубину Новоукраинско-Кировоградского и Корсунь-Новомиргородского массивов и установить, каким именно образом мантийный ров соединяется с полосой концентрации рудных месторождений на поверхности.

Сейсмические исследования МОВЗ в Кировоградском рудном районе проводились с 1977 по 1980 г. [Крюченко, Исанина, 1981]. Регистрация продольных и обменных волн осуществлялась трехкомпонентными сейсмостанциями типа "Земля" в полосе частот 0,7—12 Гц со средним расстоянием между пунктами наблюдения 3—4 км. Полевые наблюдения и интерпретация материалов проводилась по стандартной методике. Профили отрабатывались несколькими стоянками. Длительность стоянок (одновременно работающих станций) составляла 15—27 дней. Стоянка считалась отработанной, если были зарегистрированы не менее 8—10 информативных землетрясений с продольной волной, имеющей запись четких вступлений. Всего за это время отработано восемь профилей: два меридиональных, четыре широтных и два диагональных, проинтерпретированы материалы по 33 стоянкам, зарегистрированы обменные волны от 481 землетрясения. В результате был накоплен значительный объем фактического материала и впервые сделана попытка статистической обработки поля обменных волн и их увязки с данными ГСЗ [Крюченко, 1984].

В 2009—2010 гг. данные МОВЗ заново обработаны с использованием программного пакета "КОСКАД-3D" [Никитин и др., 2004].

Основные отличия от предыдущих работ заключаются в следующем:

- заново были оцифрованы и обработаны исходные данные по всем восьми профилям МОВЗ;

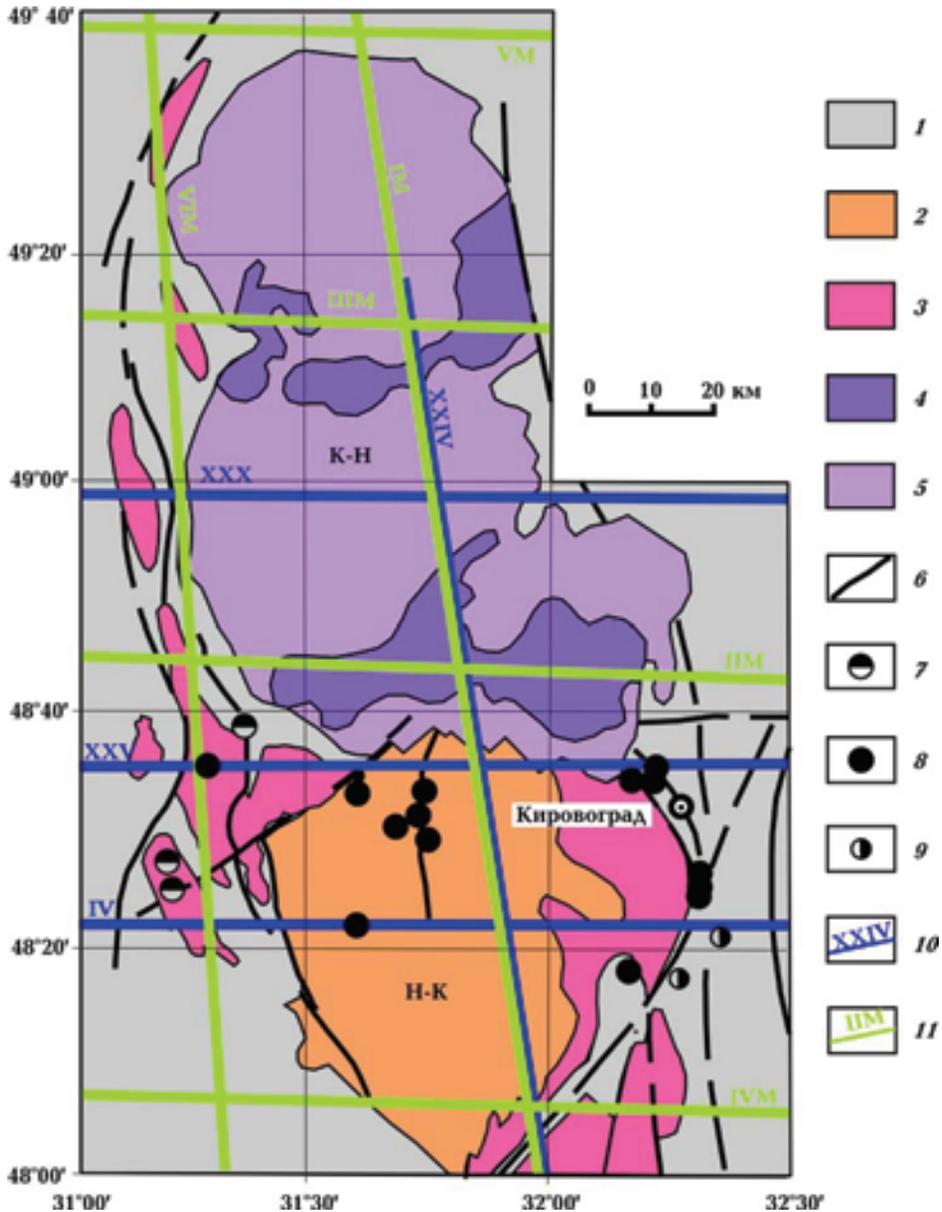


Рис. 5. Сейсмическая изученность Кировоградского рудного района: 1 — ингуло-ингулецкая серия; 2, 3 — Новоукраинско-Кировоградский массив (Н-К) (2 — диорит-монцитовая формация; 3 — гранит-мигматитовая формация); 4, 5 — Корсунь-Новомиргородский массив (К-Н) (4 — габбро-анортозитовая формация; 5 — рапакиви-гранитная формация); 6 — разломы; 7—9 — месторождения и рудопроявления (7 — лития, 8 — урана, 9 — золота); 10 — профили ГСЗ и их номера; 11 — профили МОВЗ и их номера.

- при обработке использовалось изометрическое окно;
- оптимальный размер окна выбирался на основании статистического анализа всего исходного материала;
- автоматизация процесса обеспечила минимальный сдвиг окна и более высокую точность результатов;
- использовался не один, а три параметра (признака): плотность распределения точек обмена по профилю, отношение амплитуды обменной волны к амплитуде породившей ее продольной волны A_{PS}/A_P и кратность обмена в одной и той же точке. В конечном счете, обработка каждого профиля заключалась в переходе от исходно-

го поля обменов к распределению параметра A_{PS}/A_P и построению итогового разреза в изолиниях. В качестве примера на рис. 6 изображен фрагмент профиля ИМ.

Перед обработкой исходные данные были интерполированы в плоскости каждого профиля по сетке 1×1 км. Размер интерполяционного окна был обусловлен расстоянием между сейсмостанциями (3—4 км) и длиной регистрируемых продольных и поперечных волн (500—1000 м). Интерполяция осуществлялась методом Крайгинга, суть которого заключается в весовом осреднении поля в интерполируемых точках. Предварительно на основе пространственно-статистического анализа всех данных по профилю строились вариограммы, из которых и выбирались весовые коэффициенты (Surfer 8).

В ходе работ были вычислены коэффициенты линейной корреляции: плотности распределения точек обмена, отношения A_{PS}/A_P и кратности обмена. Коэффициент их взаимной корреляции колебался от 0,94 до 0,98 при статистической точности определения не менее 10 % (среднее квадратичное отклонение 0,09—0,11). Следовательно, все три параметра характеризуют один и тот же физический признак — степень гетерогенности или слоистости среды.

Параметр A_{PS}/A_P менее других зависит от условий проведения эксперимента: времени наблюдения и расстояния между станциями. Соответственно на каждом профиле было проанализировано распределение параметра A_{PS}/A_P : количество интерполированных точек, среднее значение и среднее квадратичное отклонение по профилю, пределы изменения и значение центра распределения. Все в рабочей шкале значений параметра.

Существенная неравномерность распределения исследуемого параметра, слабое заполнение данными, связанное с коротким периодом проведения эксперимента, значительный разброс значений даже на небольшой площади профиля и большие размеры целевых объектов потребовали оптимальным образом отфильтровать (осреднить) исходные данные. Для фильтрации было выбрано круговое окно с радиусом 11,5 км, близким среднему радиусу автокоррекции аномалий, вычисленному как средневзвешенное для всех профилей. Использование кругового окна исключило возможность искусственного доминирования какого-либо одного направления.

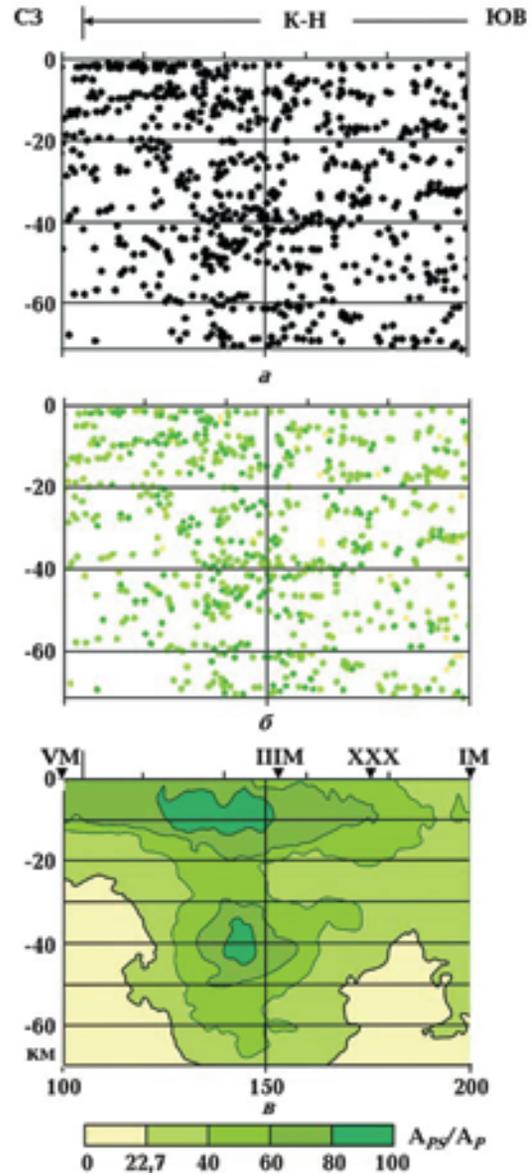


Рис. 6. Трансформация поля обменных волн. Фрагмент профиля ИМ: *a* — исходное поле обменов; *b* — распределение параметра A_{PS}/A_P в тех же точках; *v* — результат осреднения параметра A_{PS}/A_P в изометрическом окне ($R = 11,5$ км).

На итоговых разрезах изолинии соответствуют средневзвешенному значению параметра A_{PS}/A_P для всех профилей (C), верхнему пределу фона ($C + 1,3 \times S$), нижнему пределу аномалии ($C + 2,5 \times S$), где C — среднее значение, а S — среднее квадратичное отклонение от среднего значения. Обработанные таким образом данные МОВЗ по каждому из профилей приведены в работе [Старостенко и др., 2010].

Увязка профилей позволила построить серию каркасных блок-диаграмм поля обменов волн землетрясений. Одна из диаграмм приведена на рис. 7. Она опирается на два меридиональных (IM, VIM) и два широтных (IIIM, IVM) профиля МОВЗ. Профиль IM проходит вдоль осевой части Новоукраинско-Корсунь-Новомиргородского плутона и пересекает расположенный на глубине мантийный ров. Профиль IIIM характеризует центральную часть Корсунь-Новомиргородского массива, профиль IVM — Новоукраинско-Кировоградский массив. Указанные профили были отработаны в разное время и отображают распределение обменных волн от различных землетрясений с разными эпицентрными расстояниями. В 2009—2010 гг. профили также обрабатывались по отдельности. Тем не менее в местах пере-

сечения профилей аномалии A_{PS} / A_P совпадают друг с другом. Наиболее убедительный пример — узел пересечения профилей IM и IIIM, в котором между собой согласуются не только аномальные, но и все изолинии параметра A_{PS} / A_P . Эти факты свидетельствуют о высокой надежности изложенного выше способа анализа поля обменных волн землетрясений.

Каркасные блок-диаграммы обменных волн землетрясений стали связующим звеном между поверхностными структурами Кировоградского рудного района, Новоукраинско-Корсунь-Новомиргородским плутоном и мантийным рвом, над которым сосредоточены месторождения урана, лития и золота. В итоге именно согласованный анализ геологических данных и результатов работ методами ГСЗ и МОВЗ

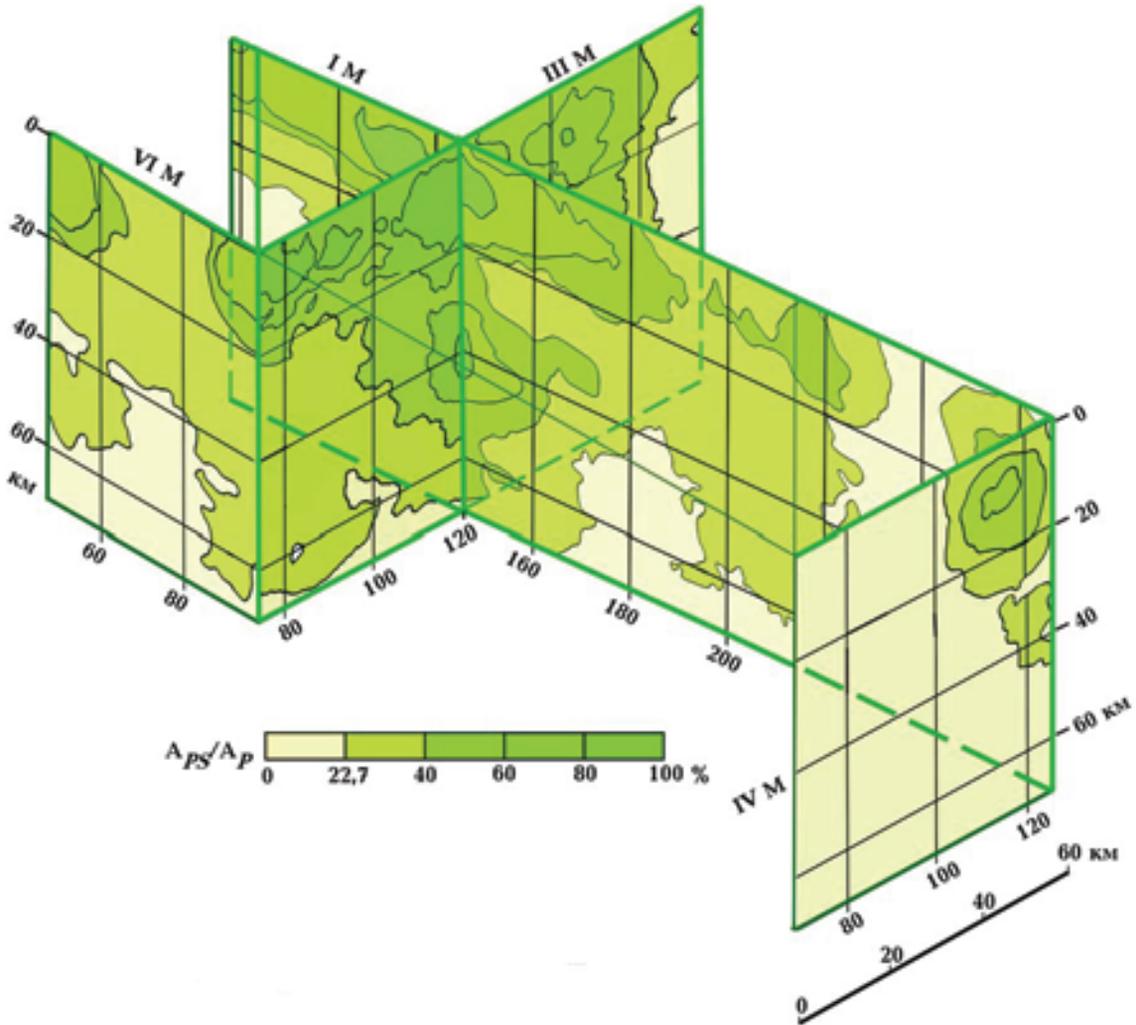


Рис. 7. Каркасная блок-диаграмма распределения параметра A_{PS} / A_P .

позволил построить сейсмогеологическую модель Кировоградского рудного района, изображенную в виде блок-диаграммы на рис. 8.

Модель характеризует современное глубинное строение Кировоградского рудного района на всю мощность древней континентальной земной коры, включая раздел кора—мантия. Модель отражает пространственную сопряженность корового Новоукраинско-Кировоградского и мантийного Корсунь-Новомиргородского рапакиви-анортозитового массива в виде единого плутона. Согласно модели Новоукраинско-Корсунь-Новомиргородский плутон определяет архитектуру Кировоградского рудного района не только на поверхности, но и на глубине. Вместе с тем модель демонстрирует принципиальное различие указанных массивов по вертикальной протяженности, морфологии, распределению аномалий A_{PS} / A_P .

Корсунь-Новомиргородскому массиву в интервале глубин 0—20 км присуща крупная аномалия A_{PS} / A_P . Она протягивается в меридиональном направлении на 60—70 км и в широтном направлении на 40—50 км, выходя

за пределы обнаженной части массива. В узле пересечения профилей IM и IIIМ она достигает максимальной интенсивности более 80 %. Вторая аномалия столь же высокой интенсивности зафиксирована на глубине около 40 км. Ее эпицентр находится вблизи раздела Мохо. Вторая аномалия либо отражает положение питающего канала для расположенной выше плитообразной интрузии анортозитов и гранитов рапакиви, либо указывает на положение промежуточной магматической камеры.

Под Новоукраинско-Кировоградским гранитоидным массивом аномалии A_{PS} / A_P протягиваются на меньшую глубину, имеют меньшую интенсивность и разделены почти вертикальными зонами фоновых значений этого параметра. Одна из них соединяет мантийный ров с широтной полосой концентрации месторождений урана, лития и золота на поверхности. Физическая природа указанной крутопадающей зоны пока не установлена. Не исключено, что в ее пределах происходят рассеяние энергии сейсмических волн, интерференция волн разного направления, создающие видимость изоморфного внутреннего строения.

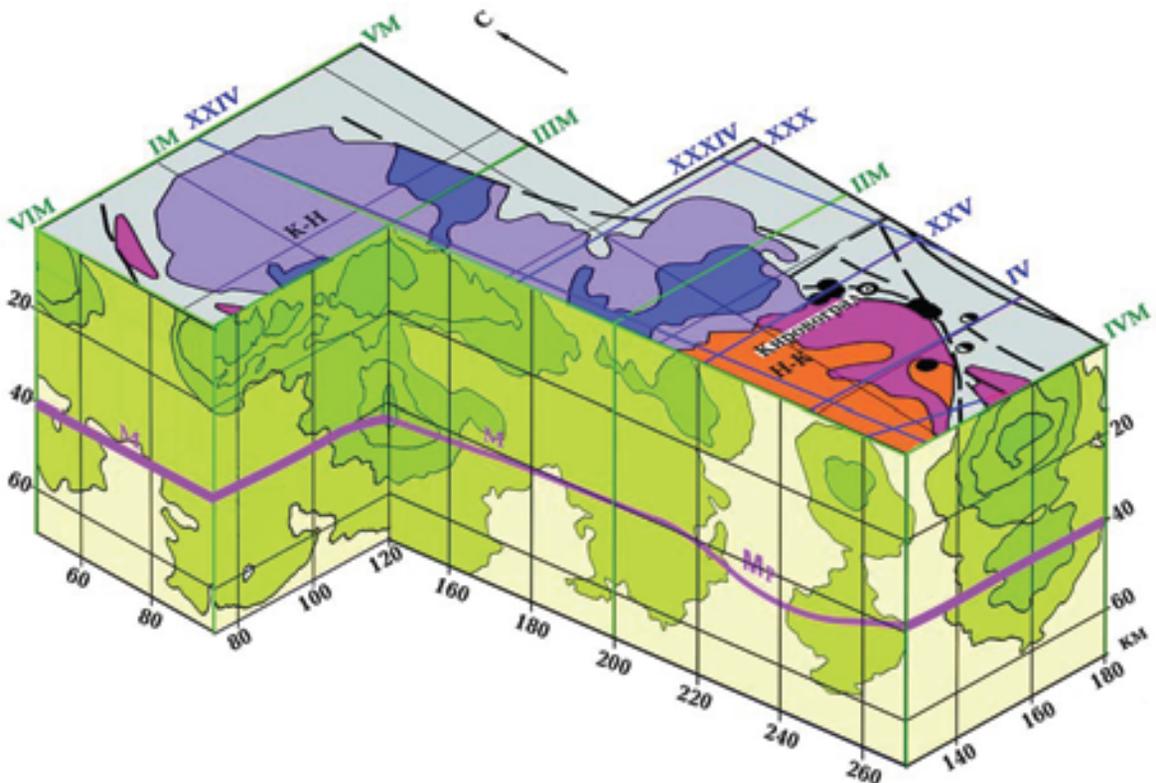


Рис. 8. 3D сейсмогеологическая модель Кировоградского рудного района: М — раздел Мохо, M_P — мантийный ров. Остальные условные обозначения см. на рис. 5 и 7.

Заключение. В ходе работ по изучению глубинного строения Кировоградского рудного района на основе корреляции геологических и сейсмических данных содержание и объем тех и других все более увеличивались.

В последних статьях под общим названием "От поверхностных структур к интегральной глубинной модели Кировоградского рудного района" геологические данные объединили сведения о тектонике, магматизме, метаморфизме, геохронологии и рудных месторождениях района, сейсмические данные — сведения о скоростных параметрах земной коры, локальных глубинных неоднородностях, морфологии раздела Мохо.

В результате установлено, что общий структурный план Кировоградского рудного района на поверхности и на глубине определяет Новоукраинско-Корсунь-Новомиргородский плутон, образованный в течение двух краткосрочных этапов корового и мантийного магматизма, что Новоукраинско-Кировоградский гранитоидный и Корсунь-Новомиргородский рапакиви-анортозитовый массивы различаются по вертикальной протяженности и внутреннему строению, что пространственное распределение пегматитовых литиевых, метасоматических урановых и гидротермальных золотых месторождений определяют различные комбинации структур интрузивно-ультраме-

таморфического цоколя и наложенных на цоколь систем разрывных нарушений.

На первых этапах работы геологические и сейсмические данные сопоставлялись в самом общем виде. В 2010—2011 гг. была достигнута их согласованная корреляция в виде трехмерной сейсмогеологической модели Кировоградского рудного района. В ней в единой системе координат и в одном и том же масштабе синтезированы разнородные сведения о поверхностных структурах района, строении земной коры и морфологии раздела Мохо.

Накопленные фактические данные и приобретенный опыт создают реальную основу для построения итоговой интегральной глубинной модели Кировоградского рудного района. Поскольку на поверхности магматические горные породы и рудные месторождения датированы изотопными методами, интегральная модель может быть дополнена четвертой координатой — временем. В частности, пространственная связь урановых месторождений с возрастом 1,8 млрд лет с мантийным рвом может быть использована для оценки времени формирования раздела кора—мантия и для доказательства реликтовой природы этого раздела в Кировоградском рудном районе.

Работа выполнена по соглашениям о научном сотрудничестве между ИГФ НАН Украины, ИГЕМ РАН и КП "Кировгеология" и при поддержке программы П-24 Президиума РАН.

Список литературы

- Бакаржиев А. Х., Макивчук О. Ф., Попов Н. И. Создание минерально-сырьевой базы Украины // Разведка и охрана недр. — 2005. — № 10. — С. 50—58.
- Генетические типы и закономерности размещения урановых месторождений Украины / Отв. ред. Я. Н. Белевцев, В. Б. Коваль. — Киев: Наук. думка, 1995. — 396 с.
- Державна геологічна карта України. — 1 : 200 000. Центральноукраїнська серія. Аркуш М-36-XXII (Новоукраїнка). — Київ, 2001.
- Дрогицкая Г. М., Трипольский А. А., Попов Н. И., Казанский В. И., Тарасов Н. Н., Шаров Н. В. Сейсмогеологическая позиция Кировоградского рудного района (Украинский щит) в связи с локальными неоднородностями поверхности Мохо. Геофизика XXI столетия: 2006 год: Сб. тр. Восьмых геофиз. чтений им. В. В. Федынского (Москва, 2—4 марта 2006 г.). — Москва, 2007. — С. 21—27.
- Иванов Б. Н., Лисенко В. В., Макивчук О. Ф. Екзоконтатні метасоматити літєвих гранітних пегматитів Шполян-Ташлицького рідкіснометального району // Мінеральні ресурси України. — 2000. — № 4. — С. 11—13.
- Крюченко В. А. Сопоставление результатов статистической обработки материалов МОВЗ и ГСЗ по профилю Канев — Николаев // Глубинное строение земной коры и верхней мантии Украины. — Киев: Наук. думка, 1984. — С. 3—16.
- Крюченко В. А., Исанина Э. В. Особенности глубинного строения южной части Кировоградского блока по данным МОВЗ и гравиметрии // Геол. журн. — 1981. — № 2. — С. 97—104.

- Нечаев С. В., Гурский Д. И., Третьяков Е. И.* Литий. Полоховское месторождение // *Металлические и неметаллические полезные ископаемые Украины. Т. 1 Металлические полезные ископаемые* / Ред. Н.П. Щербак, А.П. Бобров. — Киев; Львов: Изд. Центр Европы, 2005. — С. 293—301.
- Нечаев С. В., Макивчук О. Ф., Белых Н. А., Иванов Б. Н., Кузьменко А. К., Прытков Ф. Я., Богдариенко С. Н., Бугаенко В. Н., Семка В. А.* Новый редкометалльный район Украинского щита // *Геол. журн.* — 1991. — № 4. — С. 119—123.
- Никитин А. А., Петров А. В., Алексашин А. С.* Комплекс спектрально-корреляционного анализа данных "КОСКАД-3D". — Москва: Изд. Моск. гос. геологоразвед. ун-та, 2004. — 158 с.
- Старостенко В. И., Казанский В. И., Дрогицкая Г. М., Макивчук О. Ф., Попов Н. И., Трипольский А. А., Тарасов Н. Н., Шаров Н. В.* Связь поверхностных структур Кировоградского рудного района (Украинский щит) с локальными неоднородностями коры и рельефом поверхности 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). I // *Геофиз. журн.* — 2010. — **32**, № 1. — С. 3—33.
- Щербак Н. П., Артеменко Г. В., Лесная И. М., Пономаренко А. Н.* Геохронология раннего докембрия Украинского щита. Протерозой. — Киев: Наук. думка, 2008. — 239 с.