

П. А. Миненко

Обратная нелинейная задача гравиметрии на основе аналогов фильтров Винера–Калмана

(Представлено членом-корреспондентом НАН Украины Н. А. Якимчуком)

An iterative method of solution of a nonlinear inverse problem of gravimetry on the basis of the joint application of several cards of the measured field and several vectors of entry conditions for depths up to blocks of rocks in one iteration is developed. Examples of the interpretation of the gravitational field measured in the Western Krivbass are given.

Получение однозначных, устойчивых и геологически содержательных решений обратной задачи гравиметрии (ОЗГ) возможно только при эффективной фильтрации интенсивных помех гравитационного поля [1].

Известны сеточные методы решения обратной линейной задачи гравиметрии (ОЛЗГ) с помощью итерационных оптимизирующих алгоритмов с фильтрацией помех поля на основе критерия минимума нормы поправок к плотности при использовании гибридных аналогов фильтров Винера–Калмана для двух и более векторов начальных условий [2–4]. Однако при постоянном наборе глубин до каждого блока интерпретационной сеточной модели обеспечивается только устойчивость и частично геологическая содержательность решения ОЛЗГ. Из-за явления эквивалентности решения ОЗГ не являются единственными.

В настоящем сообщении поставлена цель создания итерационных методов решения обратной нелинейной задачи гравиметрии (ОНЗГ) с использованием аналогов фильтров Винера–Калмана [2, 4].

Для этого используем разделенную на несколько частей карту гравитационного поля g_j ($j = 1, N$), содержащую N точек измеренного поля, и столько же наборов начальных условий $(\sigma_k, h_k$ при $k = 1, 2, \dots)$, образующих коридоры существования решения ОЗГ не только по аномальной плотности $\sigma_{i,k}$ ($i = 1, M$, где M — количество блоков) но и по глубинам $h_{i,k}$ до каждого i -го блока сеточной модели. Каждую часть поля $g_{j,k}$ получаем путем набора точек с измеренным в них полем силы тяжести, взятых через одну, две и более точек на каждом профиле или взятых через один, два и более полных профилей. Для каждой части поля используем одну и ту же сеточную геологическую модель, состоящую из блоков, размещенных в нескольких слоях, и для нее же на каждой n -й итерации вычисляем матрицы решения прямых задач гравиметрии $a_{ij,n,k}$ и $b_{ij,n,k} = (a_{ij,n,k})'_z$. Возможно также получение предварительных, в разной степени приближенных, устойчивых решений ОЛЗГ и ОНЗГ различными фильтрационными экстремальными и избирательно-экстремальными [5] методами. Эти решения можно более выгодно использовать в качестве начальных условий для следующих этапов интерпретации поля предложенными здесь новыми итерационными методами.

Запишем итерационную формулу для n -го шага вычисления глубины до верхней грани i -го блока:

$$h_{i,n+1,k} = h_{i,n,k} - \tau_{0,n+1,k} - (\tau_{l,n+1,k}, C_{i,n,l}) \quad \text{при} \quad l = 1, 2, \dots, \quad (1)$$

где $C_{i,n,k} = \sum_j b_{ij,n,k} r_{j,n,k} / (\lambda_{1i} \lambda_{1j})$ — поправка для глубины до блока на следующей итерации; $\{\tau_{l,n+1,k} : l = 0, 1, 2, \dots\}$ — вычисляемые на n -й итерации итерационные коэффициенты для $n + 1$ -й итерации; $r_{j,n,k}$ — невязка вычисленного и измеренного поля, описываемая равенствами

$$r_{j,n,k} = (a_{ij,n,k}, \sigma_{i,k}) - g_{j,k}; \quad \lambda_{1i} = \sum_j |b_{ij,n,k}|; \quad \lambda_{1j} = \sum_i |b_{ij,n,k}|.$$

Элементы матрицы решения прямой задачи гравиметрии и невязки поля с учетом формулы (1) имеют вид

$$a_{ij,n+1,k} = a_{ij,n,k} + b_{ij,n,k}((\tau_{l,n+1,k}, C_{i,n,l})l + \tau_{0,n+1,k}); \quad (2)$$

$$r_{j,n+1,k} = r_{j,n,k} + (\sigma_{i,k}, b_{ij,n,k}((\tau_{l,n+1,k}, C_{i,n,l})l + \tau_{0,n+1,k}))_i \quad \text{при} \quad i = 1, M. \quad (3)$$

Составим критерий минимума квадратичной нормы поправки для глубины до блоков:

$$\sum_i C_{i,n+1,k}^2 = \sum_i (C_{i,n,k} + (\tau_{l,n+1,k}, F_{i,n,l,k})l)^2 = \min, \quad (4)$$

где

$$F_{i,n,0,k} = \sum_j \frac{b_{ij,n,k}}{\lambda_{1i} \lambda_{1j}} \sum_i \sigma_{i,k} b_{ij,n,k}, \quad F_{i,n,l,k} = \sum_j \frac{b_{ij,n,k}}{\lambda_{1i} \lambda_{1j}} \sum_i \sigma_{i,k} b_{ij,n,k} C_{i,n,l}.$$

Дифференцируя выражение (4) поочередно по всем τ и приравнивая каждую производную нулю, получим системы уравнений для определения всех итерационных коэффициентов выражения (1) при $k = 1, k = 2$ и т. д.:

$$(\tau_{l,n+1,k}, (F_{i,n,l_1,k}, F_{i,n,l,k})_i)l = -(C_{i,n,k}, F_{i,n,l_1,k})_i \quad \text{при} \quad l_1 = 0, 1, 2, \dots \quad (5)$$

Аналогично, составим критерий минимума квадратичной нормы поправки $B_{i,n,k}$ для аномальной плотности блоков [6]:

$$\sum_i B_{i,n+1,k}^2 = \sum_i (B_{i,n,k} + (\tau_{l,n+1,k}, D_{i,n,l,k})l)^2 = \min, \quad (6)$$

где

$$B_{i,n,k} = \left(\frac{a_{ij,n,k}}{\lambda_i}, \frac{r_{j,n,k}}{\lambda_j} \right) \quad \text{при} \quad \lambda_i = \sum_j a_{ij,n,k}, \quad \lambda_j = \sum_i a_{ij,n,k},$$

$$D_{i,n,0,k} = \sum_j \frac{a_{ij,n,k}}{\lambda_i \lambda_j} \sum_i \sigma_{i,k} b_{ij,n,k}, \quad D_{i,n,l,k} = \sum_j \frac{a_{ij,n,k}}{\lambda_i \lambda_j} \sum_i \sigma_{i,k} b_{ij,n,k} C_{i,n,l}; \quad (7)$$

$$(\tau_{l,n+1,k}, (D_{i,n,l_1,k}, D_{i,n,l,k})_i)l = -(B_{i,n,k}, D_{i,n,l_1,k})_i.$$

Таким образом, мы получили два независимых метода (1)–(3), (5) и (1)–(3), (7) решения ОНЗГ по двум различным критериям (4) и (6). Эффективность этих методов при $k = 1, 2$ проверена решением обратных задач для гравитационного поля, измеренного на Николо-Гулакском участке Западного Кривбасса. На рис. 1, а приведен фрагмент полной

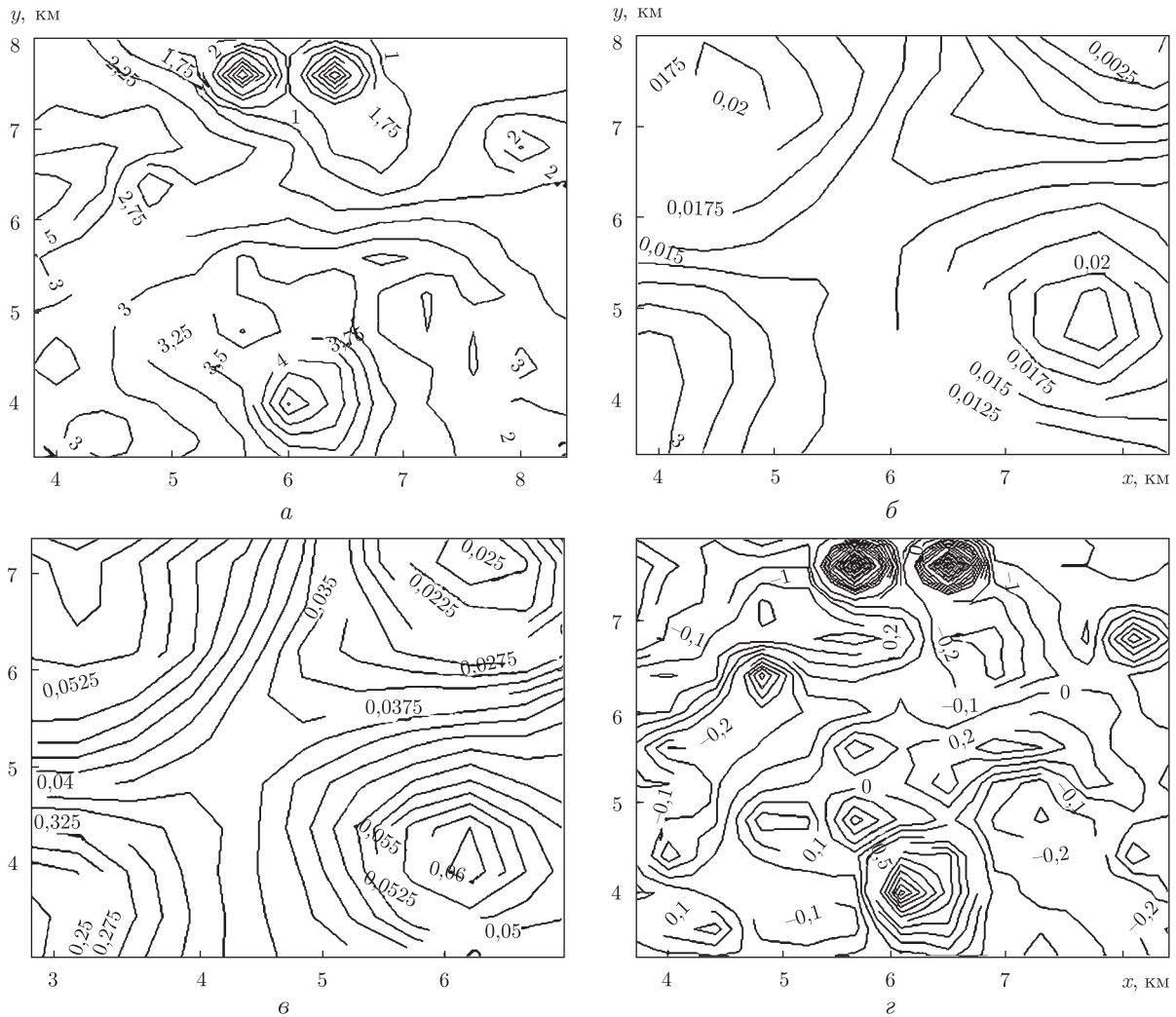


Рис. 1. Результаты решения ОЛЗГ: *a* — фрагмент карты поля силы тяжести в северо-восточной части участка (изолинии здесь и далее приведены в 10 мкН/кг , горизонтальные размеры — в 10^3 м); *б, в* — фрагменты карт аномальной плотности горных пород первого и второго слоев (изолинии, 10^3 кг/м^3). Результаты решения ОНЗГ: *г* — фрагмент карты остатков поля (разностей между вычисленным и измеренным полем) после решения задачи предложенным методом (1)–(3), (6), (7)

карты гравитационного поля небольшого участка размерами $9,2 \times 9,2 \text{ км}^2$. Поле измерено по сети $200 \times 400 \text{ м}$, а с интерполяцией получено $N = 47 \times 47$, что равно 2209 точкам по сети $200 \times 200 \text{ м}$.

Геологические блоки интерпретационной модели имеют горизонтальные размеры $475 \times 475 \text{ м}$. Начальная глубина первого слоя 80 м , второго — 600 м . Блоки второго слоя — полубесконечные. Карта поля силы тяжести разделена на две части через каждый второй профиль. Сначала выполнено решение линейной задачи известным методом [1]. На рис. 1, *б, в* отражено общее увеличение аномальной плотности с глубиной.

Затем выполнено решение нелинейной задачи предложенным методом (1)–(3), (6), (7) на основе аналога фильтров Винера–Калмана. По двум частям разделенной карты поля силы тяжести получены практически одинаковые распределения глубин как для первого

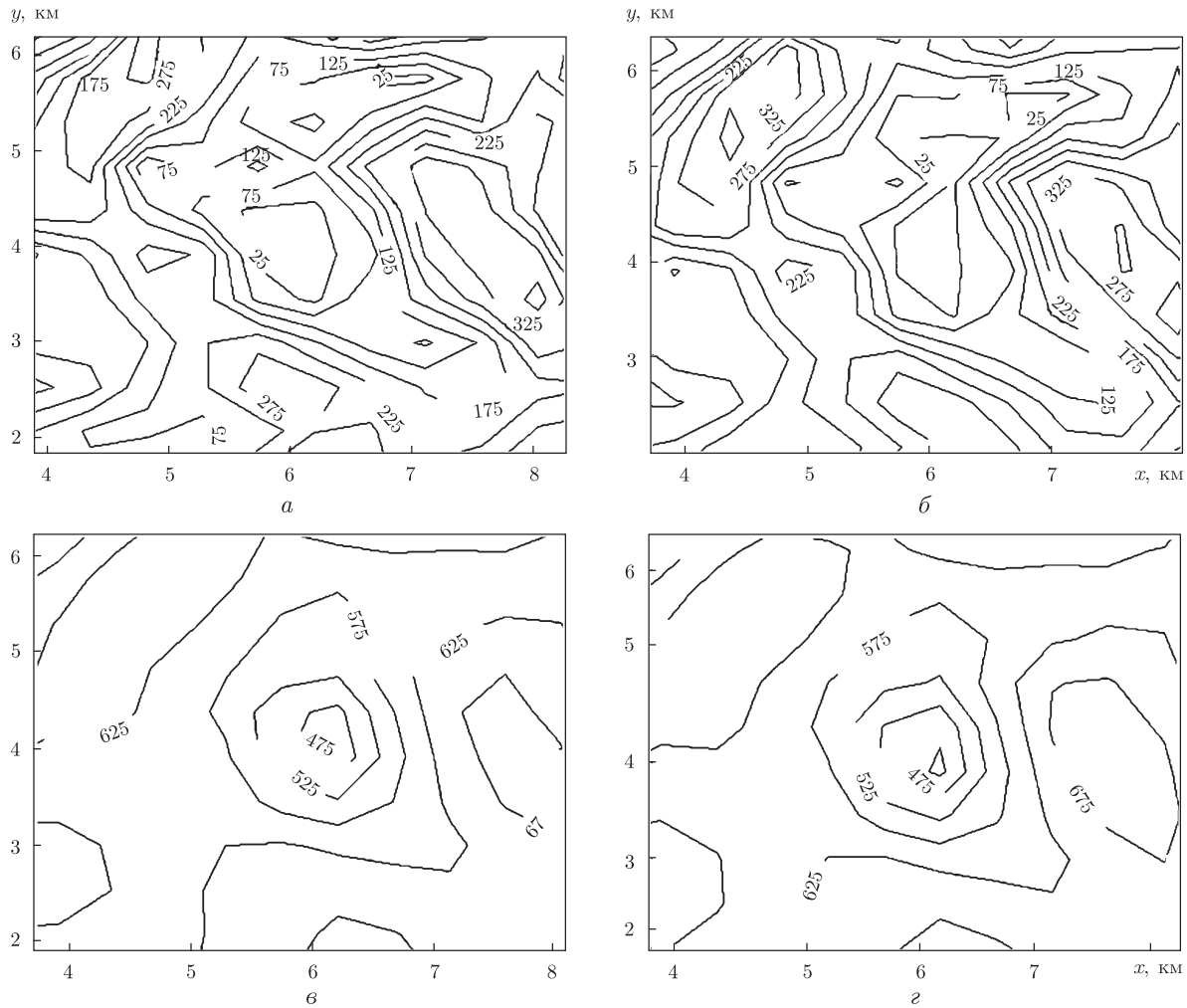


Рис. 2. Результаты решения ОНЗГ предложенным методом: *а, в* — фрагменты карт глубин (в м) до верхних поверхностей блоков первого и второго слоев горных пород, вычисленных по критерию сходимости для первой части карты поля $g_{j,1}(x,y)$; *б, г* — то же для первого и второго слоев по критерию сходимости для второй части карты поля $g_{j,2}(x,y)$

(рис. 2, *а, б*), так и для второго (рис. 2, *в, г*) слоев интерпретационной модели. На больших глубинах (см. рис. 2, *в, г*) изолинии более округлые, а перепады глубин более плавные, чем это наблюдается на малых глубинах, характеризующих характер рельефа кристаллического фундамента (см. рис. 2, *а, б*).

Для сравнения выполнено решение линейной и нелинейной ОЗГ экстремально-избирательным методом (рис. 3). Характер изолиний глубин, полученных двумя методами как в первом (см. рис. 3, *а*), так и во втором (см. рис. 3, *г*) слое почти соответствует рис. 2. Отмечается совпадение по двум методам положений изолиний с отметкой 625 м (см. рис. 2, *г* и рис. 3, *г*). Однако минимальная глубина по предложенному методу на 50 м больше, чем по избирательно-экстремальному методу. Но указанные два метода действительно могут давать различные результаты, поскольку первый прослеживает одинаковые глубины, а второй — для каждого блока находит положение максимального скачка для средней аномальной плотности двух лежащих один на другом блоков горных пород.

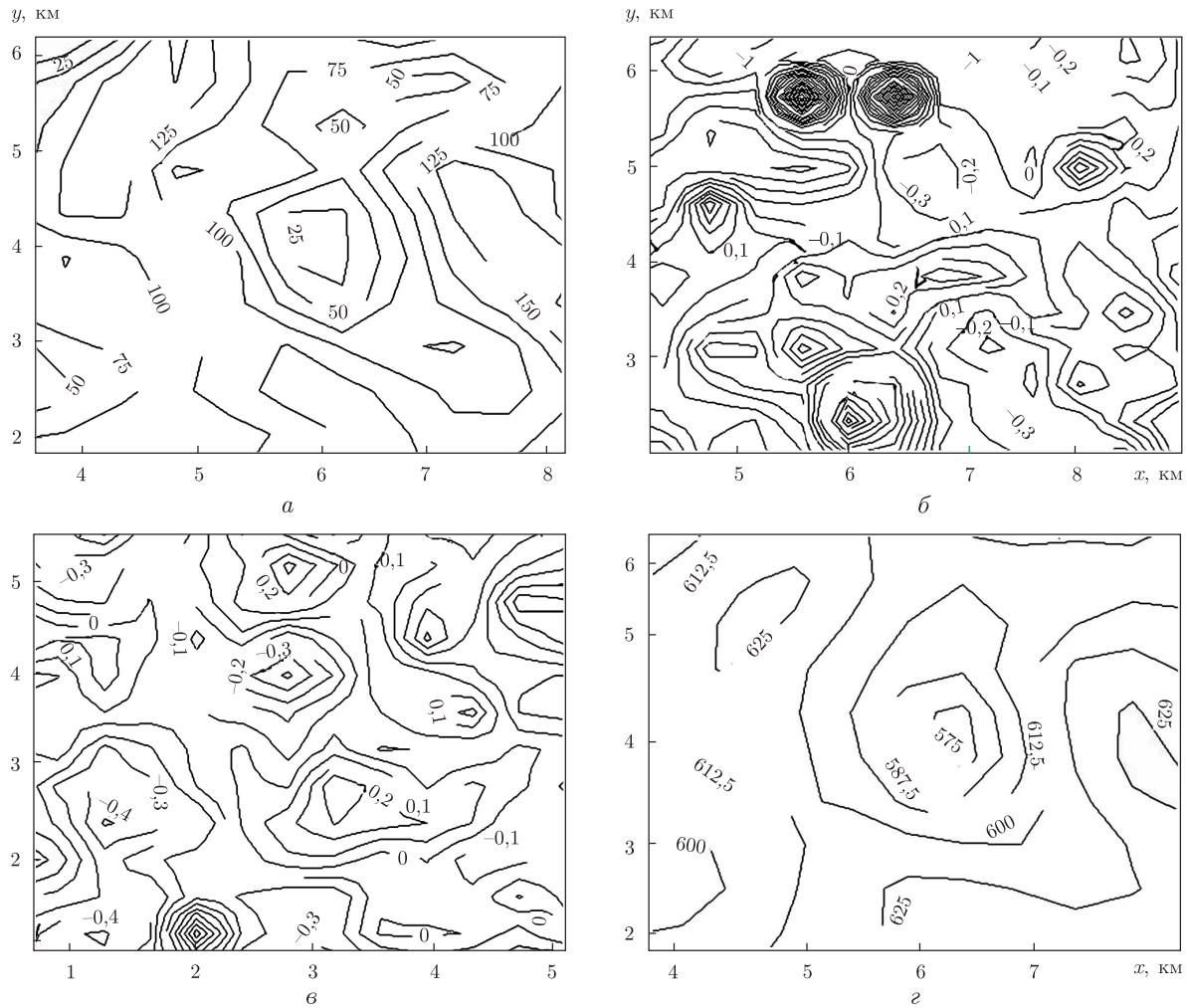


Рис. 3. Результаты решения ОНЗГ избирательно-экстремальным методом с одновременным вычислением аномальной плотности блоков и глубин до них:
 а, г — фрагменты карт глубин до первого и второго слоев блоков; б, в — фрагменты карт остатков поля силы тяжести в северо-восточном и юго-западном углах участка

Фрагменты карт остатков поля после интерпретации каждым методом (см. рис. 2, г и рис. 3, в) практически одинаковы и свидетельствуют о том, что оба метода обладают высокой фильтрационной способностью и практически полностью переносят в остатки неиспользованные узколокальные интенсивные аномалии, которые, как правило, связаны с резкими перепадами рельефа и неточным учетом плотности промежуточного слоя.

Применение фильтрационных методов интерпретации с несколькими наборами начальных условий позволяет повысить однозначность и геологическую содержательность результатов интерпретации гравитационного поля с целью детального геологического картирования комплексов кристаллических пород Украинского щита.

1. Миненко П. А. Линейно-нелинейная обратная задача гравиметрии при поисках рудных месторождений в приповерхностной части Украинского кристаллического щита: Сб. науч. тр. / Нац. горн. ун-та. Днепропетровск, 2005. — № 23. — С. 136–143.

2. Сергиенко А. Б. Алгоритмы аддитивной фильтрации: особенности реализации в MATLAB // Exponenta Pro (математика в приложениях). – Москва, 2003. – № 1. – Ч. 1. – С. 18–28.
3. Миненко П. А. Фильтрация интенсивных помех в обратной линейной задаче гравиметрии при исследованиях на кристаллических щитах // Наук. вісн. Нац. гірнич. ун-ту. – 2006. – № 6. – С. 38–43.
4. Миненко П. А. Обратная линейная задача гравиметрии на основе композиции нескольких векторов начальных условий // Доп. НАН України. – 2006. – № 9. – С. 126–130.
5. Миненко П. А. Исследование кристаллического фундамента линейно-нелинейными методами магнитометрии и гравиметрии // Геоінформатика. – 2006. – № 4. – С. 41–45.
6. Старостенко В. И., Козленко В. Г., Костюкевич А. С. Сейсмогравитационный метод: принципы, алгоритмы, результаты // Вісн. АН УРСР. – 1986. – № 12. – С. 28–42.

Европейський університет, Київ

Поступило в редакцію 26.12.2007

УДК 550.42

© 2008

Ю. А. Фомин, Ю. Н. Демихов

Изотопный состав углерода и серы раннепротерозойских пород центральной части Украинского щита

(Представлено академиком НАН Украины Е. А. Кулишем)

The new data on the isotopic composition of C graphite and S sulfides of the Khmelevsky, Lipnyazhsky, Dubinovsky, and Savransky districts in Early Proterozoic rocks of the Bugskaya series are presented. On the base of the comparison of these districts with some manifestations (including Au, U) in the stratigraphic analogs of this series in the borders of the Central Part of the Ukrainian Shield, their isotopic-geochemical identity is shown. So, the existence of the common, perspective on uranium and gold ores, lithological-stratigraphic level is confirmed.

Новые данные по изотопному составу углерода пород (графита) и серы сульфидов ряда потенциально золотоносных участков пограничной полосы Кировоградского и Белоцерковского геоблоков представлены в настоящем сообщении. Хмелевской и Липняжский участки контролируются Звенигородско-Анновской тектонической зоной в западном обрамлении Новоукраинского гранитоидного массива; Савранский и Дубиновский участки относятся к Голованевскому блоку: первый, с востока, примыкает к Тальновскому разлому, второй — расположен западней крупного северо-западного нарушения (рис. 1, см. [1]). Будучи весьма сложной в геологическом отношении, эта область вызывает противоречивые суждения, связанные с отнесением пород к разным возрастным подразделениям и с выделением здесь раннепротерозойских и архейских образований [2].

В литологическом отношении изученные участки существенно различаются. Хмелевской и Липняжский — сложены биотит-графитовыми с гранатом и сульфидами (пирротин, пирит) микрогнейсами и амфиболитами. Широко развиты также обособления аплит-пегматоидных гранитов. На обоих участках вскрыты штокверковые зоны кварц-сульфидной, включая арсенопирит, минерализации с магнетитом на фоне слабо окварцованных пород с тонкой вкрапленностью пирита, пирротина, халькопирита.