Записки Ленинградского ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова т.LXI, вып. 2, 1971 г.

СРАВНЕНИЕ СПОСОБОВ ИЗМЕРЕНИЯ ПРИ ДИПОЛЬНОМ ИНДУКТИВНОМ ПРОФИЛИРОВАНИИ

П. Д. Кочанов

Преимуществом дипольного индуктивного профилирования (ДИП) является оптимальная взаимосвязь возбудителя, датчика и искомого объекта, которая технически легко осуществима. При этом практически сравнимая во многих случаях с другими индуктивными методами глубинность достигается за счет применения упрощенной переносной аппаратуры, что позволяет существенно повысить производительность электроразведочных работ.

К сожалению, прогрессивная в своей основе методика ДИП до сих пор не получила широкого распространения, по-видимому, из-за отсутствия серийной аппаратуры. Создание и подготовка к серии наиболее совершенной аппаратуры затруднена обилием способов измерения аномального электромагнитного поля, которые требуют специализированной аппаратуры. Выбор способов измерений по известным рекомендациям затруднителен, так как они составлены на различном методическом и техническом уровне.

За основу сравнения рекомендуется принять чувствительность измеряемых величин к возмущениям поля объектом. При этом степень реализации чувствительности способа следует оценивать полевой погрешностью измерения, учитывающей методические и аппаратурные ошибки. При выборе измерения необходимо учитывать форму графика аномалий.

ДИП может успешно применяться как при поиске локальных объектов, так и при средне- и крупномасштабном картировании.

Обычно используется ближняя зона гармонического электромагнитного поля звукового диапазона частоты. В случае поиска локального электропроводного тела в точке наблюдения первичное поле H_{1m} и вторичное (реакция тела) H_{2m} линейно поляризованы (рис. 1). При этом угол γ, характеризующий относительное смещение векторов H_{1m} и H_{2m}, зависит от взаимного расположения элементов системы возбудитель — объект — датчик.

На основании принципа суперпозиции наведенная в обмотке индукционного датчика э. д. с. пропорциональна сумме проекций векторов первичного и вторичного полей на направление датчика

$$H_c = [H_{1m}\cos\beta - H_{2m}\cos(\gamma+\beta)\cos\varphi]\cos\omega t + \\ + H_{2m}\cos(\gamma+\beta)\sin\varphi\sin\omega t, \qquad (1)$$

где β — угол наклона датчика; φ — начальная фаза вторичного поля; ωt — текущая фаза.

Выделив в выражении (1) реальную часть

$$\mathrm{Re}\, H_c = H_{1m} \cos\beta - H_{2m} \cos(\gamma + \beta) \cos\varphi \qquad (2)$$

и мнимую

$$\mathrm{Im}\, H_c = H_{2m} \cos(\gamma + \beta) \sin\varphi, \qquad (3)$$

можно оценить реакцию объекта через реальную, мнимую, или через вместе взятые части вектора вторичного поля.

Угол β при проведении профилирования может быть любым, но постоянным. При вертикальном задании первичного поля целесообразно соблюдать $\beta = 0$, или $\beta = \frac{\pi}{2}$, что позволяет измерять синфазную и квадратурную компоненты: в первом случае вертикальной и во втором горизонтальной составляющих суммарного поля.

При измерениях вертикальной составляющей реальная часть вектора вторичного поля наблюдается на фоне первичного поля; мнимые части векторов суммарного и вторичного полей равнозначны. Обычно при ДИП в точке наблюдения не изменяется первичное поле; это позволяет проследить изменения по профилю реальной части вектора вторичного поля. Однако неизбежный фон первичного поля и возможности аппаратуры ограничивают выявление аномалий $\frac{H_{2m}}{H_{1m}}$ интенсивностью менее 2—3%. Наблюдения мнимой части в этом смысле создают предпосылки существенного снижения порога регистрируемой аномалии (до десятых долей процента), что несомненно скажется на увеличении глубинности поиска.

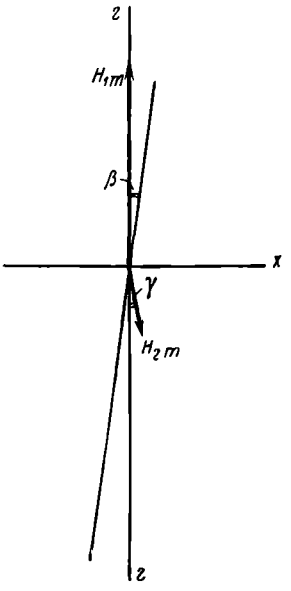


Рис. Векторная диаграмма

Компоненты горизонтальной составляющей $\left(\beta = \frac{\pi}{2}\right)$ свободны от фона первичного поля. Однако, как следует из выражения (1), погрешность измерения вертикальной составляющей пропорциональна $\cos\beta$ и практически пренебрежимо мала для $\beta \leqslant 5°$ Погрешность же измерения горизонтальной составляющей пропорциональна $\sin\beta$ и обычно ощутима уже при $\beta \geqslant 0{,}5°$ Применяя для датчика специальный измерительный столик с треногой, можно результаты измерений вертикальной и горизонтальной составляющих сделать сравнимыми по точности, но при этом измерение горизонтальной составляющей внесет мало нового и значительно уменьшит производительность.

Симметричность графика вертикальной составляющей (рис. 2) упрощает определение местоположения сферического объекта в плане и по глубине; вместе с тем его асимметричность — показатель крутизны падения пласта и направления протяженности, отличного от перпендикулярного к профилю [1]. График горизонтальной составляющей (рис. 3) всегда асимметричен, что требует повторных измерений обратным ходом для выявления формы и положения искомого тела [1, 2, 3, 4].

Таким образом, при поисках локальных тел наиболее целесообразно измерение компонент вертикальной составляющей суммарного поля (установка *ZZ*).

В электроразведке широко применяют способ амплитудно-фазовых измерений (АФИ). При этом измеряются амплитуда вектора суммарного поля

$$H_c = \sqrt{H_{1m}^2 \cos^2 \beta + H_{2m}^2 \cos^2 (\gamma + \beta) - 2H_{1m}H_{2m} \cos \beta \cos (\gamma + \beta) \cos \varphi} \quad (4)$$

и его фаза

$$\varphi_c = \operatorname{arctg} \frac{H_{2m} \cos (\gamma \quad \beta) \sin \varphi}{H_{1m} - H_{2m} \cos (\gamma + \beta) \cos \varphi}. \quad (5)$$

По измеренным H_c и φ_c рассчитываются реальные и мнимые компоненты, которые и служат исходными данными для интерпретации.

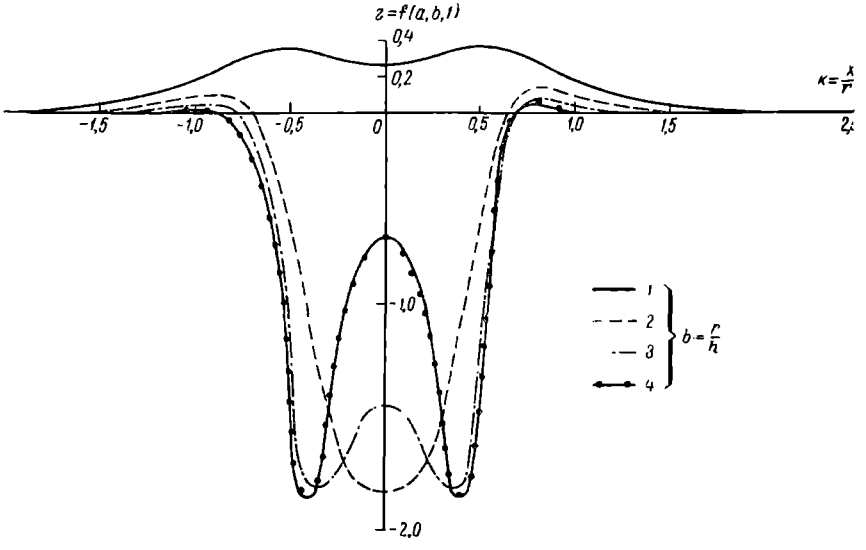


Рис. 2. Вертикальная составляющая суммарного поля вдоль профиля над эпицентром сферического объекта:

z — система координат с началом в центре сферического объекта; $a = \frac{x}{h}$ — абсцисса и $\frac{r}{h}$ — разнос рамок, выраженные в единицах глубины погруженного центра сферического объекта; $k = \frac{x}{r}$ — абсцисса в единицах разноса рамок; $z = f(a, b, 1)$ — аппликата, функция расстояний диполь-объект-датчик в вертикальной плоскости, проходящей вдоль профиля над эпицентром сферического объекта. Графики соответствуют b, равному: *1* — 1; *2* — 2; *3* — 3; *4* — 4

Для практически важных случаев интенсивность аномалии $\frac{H_{ан}}{H_н} \leqslant 0{,}4$, что позволяет упростить использование измеренных H_c и φ_c: при точности до 7% можно ограничиться первыми членами разложения (4)

$$H_c \approx H_{1m} \cos \beta - H_{2m} \cos (\gamma + \beta) \cos \varphi, \quad (6)$$

т. е. модуль вектора суммарного поля практически интерпретируется как реальная компонента. Вместе с тем, фаза измеряется в пределах

$$0 < \varphi_c < \pm 24°,$$

что без затруднений определяется по экстремумам φ_c. Пределы практических значений фазы позволяют приближенно считать $\sin \varphi_c = \varphi_c$ (с точностью до 2%), т. е. измеренная фаза интерпретируется подобно мнимой компоненте вектора суммарного поля.

Возможны амплитудно-фазовые измерения вертикальной или горизонтальной составляющей суммарного поля с аналогичными выводами о влиянии методических ошибок.

До сих пор структура электромагнитного поля в точке наблюдения рассматривалась в виде двух раздельных линейно поляризованных полей:

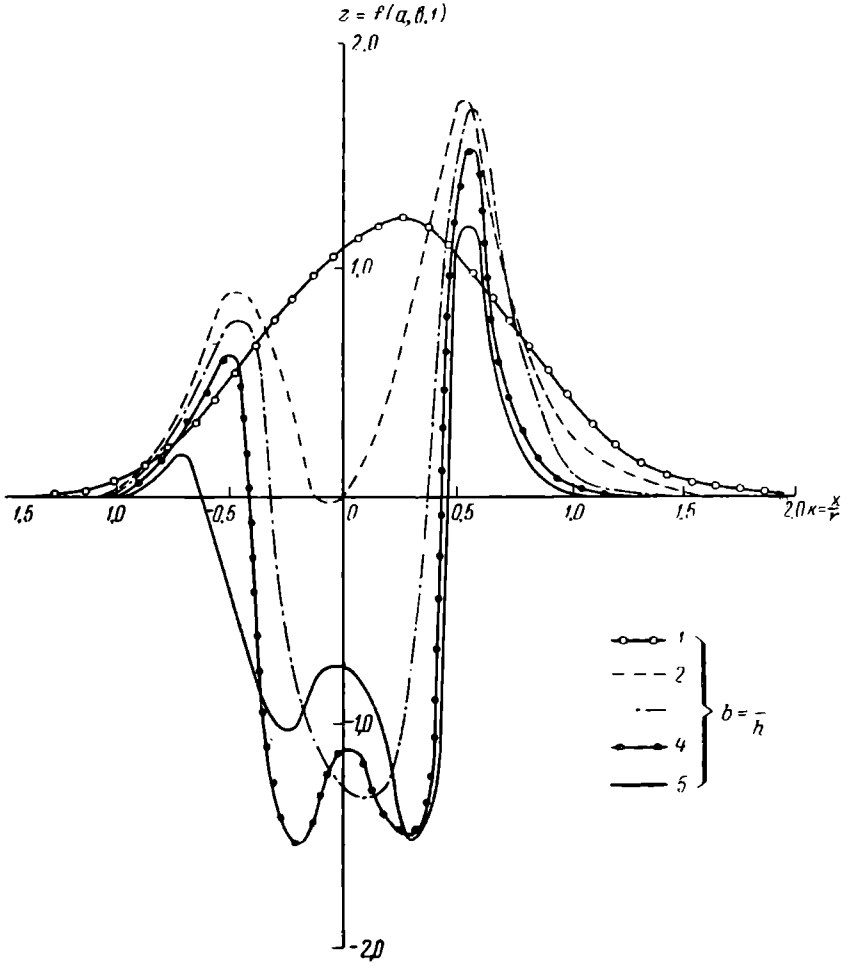


Рис. 3. Горизонтальная составляющая суммарного поля вдоль профиля над эпицентром сферического объекта. Обозначения те же, что на рис. 2, 5 — $b = 5$

первичного и вторичного. Если эти поля различаются в пространстве и во времени (по фазе и направлению), то суммарное поле можно представить в виде вектора, годограф которого в плоскости поляризации описывается эллипсом. В этом случае измерение величин поля, пропорциональных полуосям эллипса поляризации, может оказаться полезным с точки зрения его технической реализации.

Применив сложный датчик в виде двух взаимно перпендикулярных диполей и специальную схему измерителя, можно осуществить так называемый способ измерения инвариантов эллипса поляризации, при котором показания прибора теоретически независимы от дезориентации датчика [5, 6].

Действительно, э. д. с. обмоток диполей такого датчика пропорциональна ортогональным составляющим вектора суммарного поля и зависит от угла β. Но если одну из них повернуть по фазе на угол $\frac{\pi}{2}$ и затем образовать сумму и разность со второй, то последующее сложение и вычитание сигналов позволит освободиться от влияния угла β на результат измерений [5, 6]. Математические преобразования формулы (1) по указанной схеме приводят к выражениям

$$a = \frac{1}{2}\left[\sqrt{H_{1m}^2 + H_{2m}^2 - 2H_{1m}H_{2m}\cos(\gamma - \varphi)} + \sqrt{H_{1m}^2 + H_{2m}^2 - 2H_{1m}H_{2m}\cos(\gamma + \varphi)}\right], \quad (7)$$

$$b = \frac{1}{2}\left[\sqrt{H_{1m}^2 + H_{2m}^2 - 2H_{1m}H_{2m}\cos(\gamma - \varphi)} - \sqrt{H_{1m}^2 + H_{2m}^2 - 2H_{1m}H_{2m}\cos(\gamma - \varphi)}\right] \quad (8)$$

где a, b — величины, пропорциональные, соответственно, большой и малой полуосям эллипса поляризации.

В выражениях (7) и (8) a и b не зависят от β. Однако повороты датчика инвариантны только в плоскости проекции эллипса поляризации (оси датчика расположены в этой плоскости); повороты датчика в иных плоскостях влияют на a и b. Это влияние пропорционально $\cos\beta$ и, в первом приближении, может не приниматься во внимание.

Ограничиваясь первыми членами разложения формул (7) и (8) в ряд, получим

$$a \approx H_{1m} - H_{2m}\cos\gamma\cos\varphi, \quad (9)$$

$$b \approx H_{2m}\sin\gamma\sin\varphi, \quad (10)$$

т. е. большая полуось эллипса поляризации практически подобна реальной части вертикальной составляющей вектора суммарного поля, малая — мнимой части горизонтальной составляющей того же вектора (для аномалий интенсивностью менее 0,4 ошибка в расчетах не превышает 4%).

Таким образом, способ измерений инвариантов эллиптической поляризации по существу получаемой информации практически не отличается от рассмотренных раньше.* Остается теоретически обоснованное преимущество инвариантности способа измерений эллиптической поляризации поля. Однако реализация этого преимущества требует усложнений аппаратуры, которые вносят новые ошибки, снижающие ценность способа. Это подтверждается указаниями инструкций по применению аппаратуры ЭПП-1 в части калибровки установки, в которой рекомендуется не допускать ухода показаний прибора для малой полуоси эллипса поляризации более чем на 10% при наклоне оператора с датчиком на $\pm$ 20° от вертикали в плоскости профиля. При измерении компонент вертикальной составляющей наклон датчика в таких же пределах вызывает меньшие изменения в показаниях прибора; вместе с тем повороты вокруг вертикальной оси не вносят погрешностей в измерения, чего нельзя сказать о способе измерения инвариантов.

При решении вопросов геологического картирования обычно рассматривается поле магнитного диполя над проводящим полупространством.

---

* Способ измерения инвариантов эллипса поляризации поля принципиально исключает возможность измерения угла наклона большой полуоси, что обедняет геофизическую информацию.

Для вертикального диполя характерны изменения вертикальной H_z и горизонтальной H_r составляющих суммарного поля, которые зависят только от расстояния до диполя. Взаимосвязь этих составляющих со свойствами полупространства хорошо известна [2, 3, 8].

В зоне индукции вертикального источника поля (зоне «малого параметра» $p = |kr| \ll 1$) магнитные числа равны [2]

$$h_z = -1 - \frac{2i\sqrt{2}}{15}p^3 \quad i\left(\frac{p^2}{4} - \frac{2i\sqrt{2}}{15}p^3\right) \qquad (11)$$

$$h_r = \frac{p^2}{4}\left[\left(\ln\frac{p}{4} \quad c - \frac{1}{12}\right)\frac{p^2}{4} \quad i\left(1 - \frac{\pi}{16}p^2\right)\right] \qquad (12)$$

где c — постоянная Эйлера.

Выражение (11) полностью оценивает результаты способа измерения квадратурных компонент вертикальной составляющей, в то время как для способа измерения инвариантов на основании формул (9) и (10) следует принять выражения [2]

$$a = 1 + \frac{2i\sqrt{2}}{15}p^3, \qquad (13)$$

$$b = \frac{p^2}{4}\left(1 - \frac{\pi}{16}p^2\right) \qquad (14)$$

Исключив из рассмотрения a и $\mathrm{Re}\,h_z$, в силу их видимого тождества, сопоставим $\mathrm{Im}\,h_z$ и b, выделив для удобства из формулы (11)

$$\mathrm{Im}\,h_z = -\frac{p^2}{4}\left(1 - \frac{\sqrt{2}}{2}p\right) \qquad (15)$$

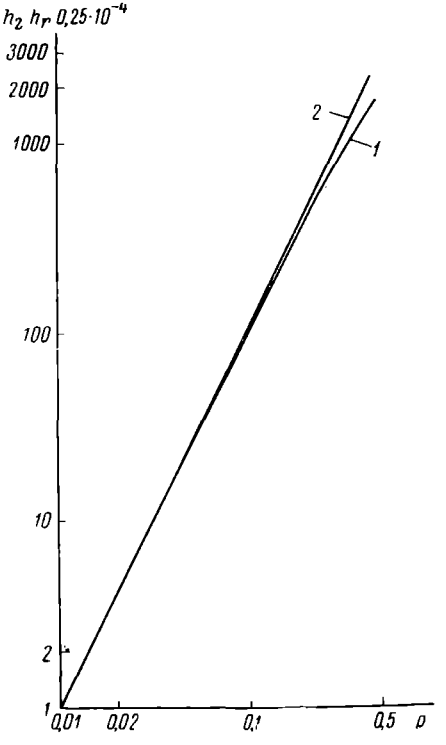


Рис. 4. Сравнение мнимых компонент вертикальной *1* и горизонтальной *2* составляющих суммарного поля (в области параметра поля p 1)

Из рис. 4 следует, что в области «малого параметра» практически нет различия в результате измерения малой полуоси эллипса поляризации или мнимой части выражения вертикальной составляющей. Этот вывод противоречит принятому в руководстве по методике ЭПП [2], где измерения вертикальной и радиальной составляющих характеризуются без разделения на реальную и мнимую части, что не позволяет в полной мере вскрыть возможности различных измерений.

Итак, расчетами показана практическая равноценность геофизической информации, получаемой каждым из рассмотренных способов измерения. Однако полнота реализации этого вывода зависит от метрологических качеств применяемой аппаратуры. Качество аппаратуры с точки зрения получения наибольшей глубинности обнаружения объекта следует оценивать ее пороговой чувствительностью (с учетом аппаратурных и методических погрешностей), которую удобно выражать в процентах нормального поля. Такая оценка показательна в случае, когда между диполем и датчиком существует разнос не менее определенной величины, зависимой от глубины залегания тела и его формы. При одинаковых условиях большую глубинность обеспечивает аппаратура, которая имеет больший разнос. Это под-

тверждается результатами сравнительных испытаний аппаратуры и методов электромагнитной разведки на одном из медно-никелевых месторождений Кольского полуострова, которые выполнялись по инициативе и под руководством ВИРГ с участием авторов способов и аппаратуры.*

Для эксперимента было выбрано известное рудное тело высокой проводимости пластовой формы пологого падения, залегающее среди весьма высокоомных изверженных пород. Разведанная часть тела 300 × 500 *м*. Профили располагались параллельно простиранию тела, что позволило опробовать аппаратуру при разной глубине (от 10 до 150 *м*). Рассмотренные способы измерения обеспечивались аппаратурой, имеющей следующие параметры:

Тип	ЭПП-1	АФИ-ЛГИ	ПЭМК-1
Максимальный разнос, *м*	90	60	80
Пороговая чувствительность, % к нормальному полю в части:			
вещественной	2	1	2
мнимой	0,2	0,3	0,5
Конструкция датчика	Взаимно перпендикулярные диполи	Вертикальный диполь с шаровым уровнем	Самоотвешивающийся вертикальный диполь
Максимальная глубина обнаружения объекта, *м*.	90	60	80

По этим результатам качество использованного комплекта аппаратуры типа ЭПП-1 в целом заслуживает высокой оценки. Однако измеритель инвариантов усложнен применением квадратурных фазовращателей и фазоинвертеров, вследствие чего для сохранения точности необходимо систематически, не реже одного раза в час и всякий раз при переходе на новую рабочую частоту, калибровать установку. Калибровка требует особого размещения и специальных соединений блоков аппаратуры. Подобная калибровка и сложность измерителя, несомненно, затрудняют эксплуатацию аппаратуры и выпуск ее серией.

Значительно проще сконструирован афиметр типа ЛГИ. «Сумморазностная» схема измерителя не имеет фазорегулирующих устройств, а способ сравнения с опорным напряжением при каждом измерении исключает зависимость результатов от частотных и температурных влияний. Кроме того, в связи с требованиями унификации электроразведочной аппаратуры, афиметр перспективен для создания единого измерителя как основного блока аппаратуры многих различных методов (постоянного и переменного тока). Разнос между источником поля и датчиком обеспечивается в пределах 100—120 *м* применением генератора, сравнимого по мощности с генератором аппаратуры типа ЭПП-1.

Выводы

1. Для выяснения преимуществ все способы необходимо сравнивать со способами измерения квадратурных компонент магнитной составляющей суммарного электромагнитного поля.

2. Практически целесообразен способ измерения вертикальной составляющей суммарного поля, при котором достигаются наименьшие методические погрешности измерения.

---

* В брошюре Б. С. Светова «Методика и аппаратура для исследования эллиптически поляризованного магнитного поля при индуктивной электроразведке», ОНТИ ВИЭМС, № 11, 1967 опубликованы не согласованные с материалами ВИРГ данные в части результатов испытаний на Кольском месторождении.

3. Реализация разных способов требует аппаратуры различной сложности. Так как все рассмотренные способы обеспечивают равноценную геофизическую информацию, способ целесообразно выбирать с учетом удобства и надежности аппаратуры.

4. Рекомендуется способ амплитудно-фазовых измерений с применением афиметра, выполненного по суммарно-разностной схеме.

5. За основу оценки метрологических качеств аппаратуры рекомендуется принять разнос установки и пороговую чувствительность измерителя, выраженную отношением напряженностей вторичного и первичного полей в точке наблюдения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Захаров В. Х. Дипольное индуктивное профилирование с АФИ при поисках и разведке сульфидных руд. Недра, 1967.

2. Ершов Е. М., Прис Г. В. и др. Методика дипольной индукционной электроразведки с аппаратурой ЭПП-1. ЦНИГРИ, 1967.

3. Светов Б. С. О способах интерпретации аномалий индуктивного метода разведки. В сб. «Геофизразведка», вып. 4, Гостоптехиздат, 1963.

4. Пятницкий В. И. Дипольное индукционное профилирование на звуковых частотах электромагнитного поля для геоэлектрического картирования и прямого поиска проводящих руд. Автореф. канд. дисс., МГРИ, 1966.

5. Светов Б. С. Способ измерения полуосей эллипса поляризации магнитного поля и устройство для его осуществления. Авт. свид. № 132345. Бюлл. изобр. 1960, № 19.

6. Мизюк К. Я., Поджарый В. М. Об измерении параметров эллиптически поляризованного поля при индуктивной разведке. Изв. АН СССР, сер. геофиз., № 7, 1963.

7. Брискин А. М., Ершов Е. М. и др. Полевая электроразведочная аппаратура ЭПП-1. Техническое описание, инструкция по эксплуатации, производству полевых работ и регулировке. ФМИ АН УССР, ЦНИГРИ, ОПЛУ АН СССР, Москва—Львов, 1965.

8. Светов Б. С., Петровский А. Д. и др. Электромагнитные методы электроразведки в рудной геофизике. Недра, 1966.