

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОИСКОВ И РАЗВЕДКИ

УДК 550.837

Е.Д. АЛЕКСАНОВА, В.А. КУЛИКОВ, П.Ю. ПУШКАРЕВ, А.Г. ЯКОВЛЕВ

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОЛЕЙ ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННЫХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ
ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЗОНДИРОВАНИЙ**

Показано, что в поле электрифицированной железной дороги можно проводить частотное зондирование, приведены примеры использования такого поля для определения поперечного сопротивления высокоомных слоев.

Электромагнитные помехи промышленного происхождения существенно затрудняют проведение электроразведочных работ. Типичными источниками помех являются линии электропередачи (ЛЭП), электрифицированные железные дороги (ЭЖД), в том числе линии метрополитена и трамвайные линии, трубопроводы, находящиеся под коррозионной защитой, промышленные предприятия, электрические подстанции.

С точки зрения физики распространения электромагнитного поля, можно выделить источники помех двух типов: гальванического и индукционного. В первых промышленный ток непосредственно стекает в землю, во вторых переменный ток, текущий в проводах, создает токи в земле вследствие электромагнитной индукции. Для источников обоих типов характерно разное соотношение интенсивностей электрического и магнитного полей.

Электромагнитные помехи, создаваемые ЭЖД. Наиболее интенсивные поля-помехи гальванического типа связаны с электрифицированными железными дорогами. Особенно ярко этот вид помех проявляется в электрическом поле. Распространению таких помех способствуют высокоомные экраны, перекрытые проводящими отложениями. В этом случае токи, стекающие с рельсов, распространяются в надэкранной толще на большие расстояния, создавая повышенную плотность тока, следовательно, и повышенную напряженность электрического поля вблизи поверхности земли.

Для электроснабжения железных дорог используется постоянный или переменный ток с частотой 50 Гц. И в том и в другом случаях за счет изменения нагрузки и переключений тока возникает широкий спектр частот. В результате помехи, создаваемые ЭЖД, оказывают влияние на данные практически всех методов электроразведки.

Сильнее всего поля ЭЖД искажают кривые магнито-теллурических зондирований (МТЗ). Это связано с тем, что в методе МТЗ измеряется естественное электромагнитное поле, обладающее небольшой интенсивностью, а также с тем, что при обработке данных в силу случайного характера этого поля отсутствует возможность накопления полезного сигнала. Задачу подавления помех от ЭЖД при проведении МТЗ пока не удается решить даже с помощью современных методов обработки, использующих синхронные схемы наблюдений магнито-теллурического поля. Настоящая работа основана на материалах, полученных в ходе проведения сотрудниками кафедры геофизики геологического факультета МГУ и ООО «Северо-Запад» магнито-теллурических зондирований в различных регионах России.

Следует отметить, что наиболее развитая сеть ЭЖД в Центральной России (рис. 1). Здесь железные дороги постоянного тока сосредоточены в радиусе 200—300 км вокруг Москвы и Санкт-Петербурга. Также на постоянном токе работают железнодорожные магистрали Москва—Санкт-Петербург, Москва—Самара, Москва—Курск, Москва—Кострома. На большом удалении от столицы основные железные дороги работают на переменном токе, а все второстепенные не электрифицированы.

В Центральной России ситуация с помехами от ЭЖД усугубляется наличием высокоомных экранов в осадочном чехле [4]. Поля ЭЖД оказывают искажающее влияние на кривые МТЗ в зоне шириной несколько десятков километров. Как правило, подобные помехи на больших расстояниях от ЭЖД начинают проявляться в области спектрального минимума МТ-поля в диапазоне от 0,1 до 1 Гц (рис. 2). При приближении к железной дороге область помех охватывает все более широкий частотный диапазон. На кривых частотных зави-



Рис. 1. Схема железных дорог Центральной России: 1—3 — железные дороги: 1 — постоянно-го тока, 2 — переменного тока, 3 — не электрифицированные; 4 — граница России.

симостей импеданса Z наблюдается участок существенного возрастания значений, а на кривых кажущегося сопротивления — восходящая ветвь, наклоненная круче 63° . Таким образом, кривые МТЗ, полученные вблизи ЭЖД, не могут быть проинтерпретированы в рамках модели плоской волны и подлежат отбраковке.

С учетом сказанного выше можно попытаться использовать поля такого мощного источника, как ЭЖД, для получения информации о геоэлектрическом разрезе. Ранее В.С. Вишневым [3] рассмотрена возможность геометрических зондирований в поле ЭЖД, работающих на постоянном токе. Авторы данной статьи доказали, что в поле ЭЖД также возможно проведение частотных зондирований (ЧЗ).

Структура электромагнитных полей ЭЖД. Электрическая цепь на ЭЖД состоит из питающей подстанции, контактного провода, электроваза и рельсов. Через шпалы и балластный слой рельсы электрически соединены с землей, поэтому часть тягового тока может протекать по земле. Так образуется изменяющийся во времени конфигурацию гальванический источник, где роль заземлений играют места утечек тока в землю. Ситуация осложняется тем, что по железной дороге могут одновременно перемещаться несколько электровазов на участках, обслуживаемых разными подстанциями. Наиболее интенсивны помехи от железных дорог, работающих на постоянном токе, где сила электрического тока, идущего через подстанцию, иногда достигает нескольких тысяч ампер.

Очевидно, что в каждый момент времени поле ЭЖД можно представить в виде суперпозиции полей горизонтальных электрических диполей (ГЭД), расположенных вдоль железной дороги. С учетом фактора геометрического затухания в точке наблюдения будут в первую очередь сказываться источники, находящиеся на небольшом удалении. Наиболее грубой моделью, описывающей данную ситуацию, является модель одиночного ГЭД, ориентированного вдоль участка железной дороги, ближайшего к точке наблюдения. В этом

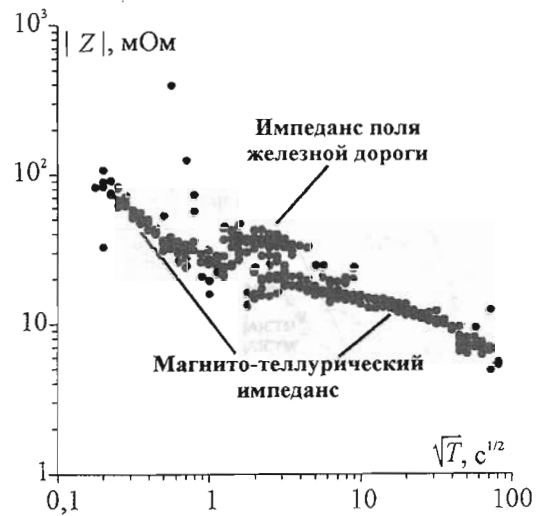


Рис. 2. Пример кривой МТЗ, искаженной помехой от электрифицированной железной дороги, находящейся на удалении 50 км

случае любая компонента электромагнитного поля пропорциональна дипольному моменту источника. Ввиду того, что он неизвестен, для получения информации о геоэлектрическом разрезе целесообразно использовать импеданс. Действительно, при нормировании электрического поля на магнитное дипольный момент источника сокращается.

Влияние геоэлектрического разреза на поля ЭЖД. Оценим влияние геоэлектрического разреза на результаты импедансного частотного зондирования [5] в поле ГЭД. Рассмотрим модель разреза, характерную для центральной части Восточно-Европейской платформы (модель *A*). Верхний проводящий слой отвечает терригенным кайнозойско-мезозойским образованиям и известково-глинистым отложениям нижнего карбона (удельное сопротивление $\rho_1 = 10 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, мощность $h_1 = 70 \text{ м}$). Второй слой — карбонатные породы верхнего девона ($\rho_2 = 150 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $h_2 = 230 \text{ м}$). Третий слой отождествляется с терригенными образованиями среднего девона и венда, насыщенными высокоминерализованными (до 200 г/л) водами ($\rho_3 = 4 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $h_3 = 1,3 \text{ км}$). Четвертый слой — высокоомный кристаллический фундамент ($\rho_4 = 500 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $h_4 = 130 \text{ км}$). В основании разреза — относительно проводящие породы мантии ($\rho_5 = 100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$).

Рассмотрим также модель *B*, которая отличается от модели *A* только сопротивлением второго слоя ($\rho_2 = 15000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$). Эта особенность модели *B* связана с присутствием в карбонатах прослоев солей, гипсов и ангидритов, обладающих очень высоким сопротивлением (до $10^5 \text{ Ом}\cdot\text{м}$). Таким образом, второй слой является ярко выраженным экраном с поперечным сопротивлением $T_2 = \rho_2 h_2 = 3,5 \cdot 10^6 \text{ Ом}\cdot\text{м}^2$, что присуще центральной и юго-западной частям Московской синеклизы [4, 5].

На рис. 3 приведены кривые кажущегося сопротивления импедансного частотного зондирования для этих моделей для двух ГЭД, расположенных вдоль одной линии, но на разных расстояниях (6 и 8,5 км) от точки наблюдения. Расчеты выполнены по программе [6]. Кажущееся сопро-

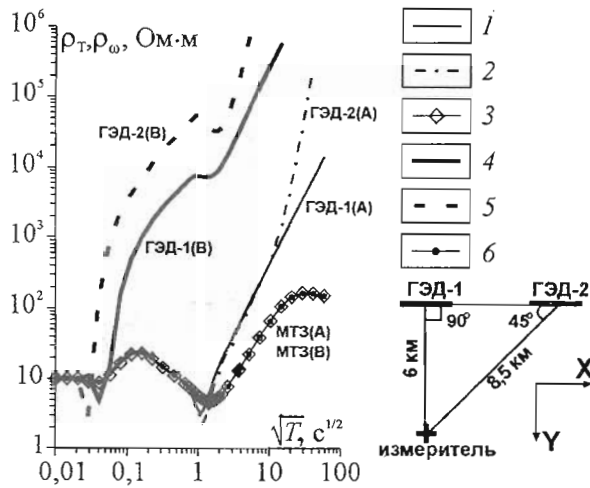


Рис. 3. Кривые МТЗ и импедансного ЧЗ для моделей А и В: 1–3 — для модели А: 1 — источник ГЭД-1, 2 — источник ГЭД-2, 3 — МТЗ; 4–6 — для модели В: 4 — источник ГЭД-1, 5 — источник ГЭД-2, 6 — МТЗ

тивление $\rho_\omega = |Z|^2 / (\omega \mu_0)$, где импеданс $Z = E_X / H_Y$, E_X и H_Y — горизонтальные компоненты напряженности электрического и магнитного полей, ω — круговая частота колебаний поля, μ_0 — магнитная проницаемость вакуума. Здесь же показаны кривые кажущегося сопротивления ρ_T для плоской волны (амплитудные кривые МТЗ).

Кривые ЧЗ, отвечающие моделям А и В, отличаются на несколько порядков. В то же время кривые для двух положений питающего диполя (при одном и том же разрезе) расходятся значительно слабее. Следовательно, погрешности, связанные с аппроксимацией поля ЭЖД полем одного диполя, существенно меньше, чем влияние сопротивления высокоомного экрана. Это позволяет по измерениям импеданса поля ЭЖД оценить величину T_2 .

Об использовании поля ЭЖД. Для изучения геоэлектрического разреза целесообразно сочетать измерения полей ЭЖД с индукционными зондированиями методом МТЗ или методом становления поля в ближней зоне (ЗСБ) с установкой «петля в петле». Последний метод отличается от метода МТЗ более высокой помехоустойчивостью, что обусловлено двумя причинами. Во-первых, в методе ЗСБ используется накопление импульсов искусственного источника, во-вторых, с помощью петли измеряется вертикальная компонента магнитного поля, в которой помехи, связанные с ЭЖД, проявляются сравнительно слабо.

Методы индукционного зондирования позволяют устойчиво определять глубины до низкоомных слоев и их продольные проводимости. При использовании гальванической составляющей, которая преобладает в полях ЭЖД, мы получаем информацию как о продольной проводимости низкоомных слоев, так и поперечном сопротивлении высокоомных. Таким образом, выполняя электромагнитные зондирования обоими методами, мы можем получить более полное представление о геоэлектрическом разрезе.

Поперечное сопротивление высокоомных слоев отражает литологию горных пород и степень их трещиноватости, а также позволяет оценить возможность применения различных методов электроразведки в конкретном регионе.

Рассматриваемый параметр определяет характер гальванического перетекания электрического тока из одного проводящего слоя в другой. В [1] показано, что расстояние, на котором ток из первого проводящего слоя может перетечь в нижележащий разрез, обратно пропорционально так называемой гальванической константе $g = \sqrt{S_1 T_2}$, где S_1 — продольная проводимость первого слоя, T_2 — поперечное сопротивление второго слоя. Зная гальваническую константу, можно оценить: 1) глубину методов постоянного тока — вертикальных и дипольных электрических зондирований (ВЭЗ и ДЭЗ); 2) расстояния, на которых происходит нормализация кривых МТЗ, искаженных гальваническим влиянием неоднородностей верхнего слоя; 3) чувствительность МТЗ и других методов электромагнитных зондирований по отношению к объектам в подэкранной толще [2]; 4) размеры области распространения помех от гальванических источников.

На Восточно-Европейской платформе приповерхностный слой представлен мезозойскими и кайнозойскими песчано-глинистыми отложениями, а роль подстилающего изолятора играют высокоомные отложения пермского, каменноугольного и девонского возрастов. Величина S_1 изменяется в небольших пределах и составляет несколько десятков сименсов. Суммарное поперечное сопротивление T_2 палеозойских отложений в большой степени зависит от наличия в них высокоомных прослоев эвапоритов (солей, гипсов, ангидритов) и может изменяться на порядок (в западной части Московской синеклизы оно составляет около $2-3 \cdot 10^6 \text{ Ом}\cdot\text{м}^2$, в центральной части Токмовского свода — $3 \cdot 10^5 \text{ Ом}\cdot\text{м}^2$, на его северном склоне — $3,5 \cdot 10^6 \text{ Ом}\cdot\text{м}^2$, в южной части Рязано-Саратовского прогиба — $2,5 \cdot 10^4 \text{ Ом}\cdot\text{м}^2$).

При высоких значениях T_2 , например, в западной части Московской синеклизы, сигналы от железной дороги искажают магнито-теллурический импеданс на расстояниях 40–50 км. В то же время отсутствие изоляторов в осадочном чехле на западе Саратовской области ($T_2 = 2,5 \cdot 10^4 \text{ Ом}\cdot\text{м}^2$) позволило получить кривые МТЗ хорошего качества на расстоянии 10–12 км от электрифицированной железной дороги Москва—Саратов.

Пример использования поля железной дороги постоянного тока. Рассмотрим результаты, полученные в ходе работ методом МТЗ на территории Республики Мордовия в непосредственной близости от железной дороги постоянного тока Москва—Самара. На участке профиля вблизи железной дороги амплитуда помехи примерно на порядок превышала амплитуду магнито-теллурических вариаций.

На кривой МТЗ, полученной в 7 км от железной дороги (рис. 4), значения кажущегося сопротивления на низких частотах на порядок выше, чем в удаленных от железной дороги точках МТЗ. Приведенная кривая аналогична результатам импеданс-

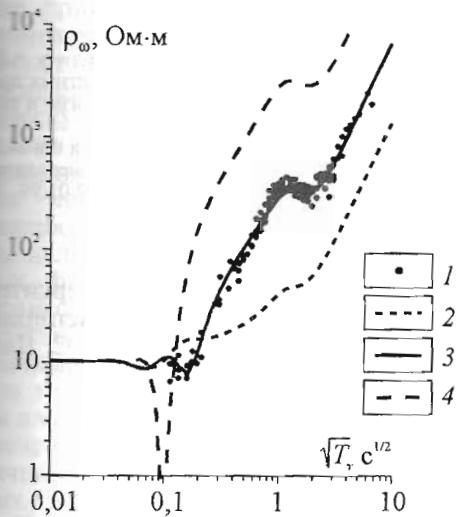


Рис. 4. Сопоставление результатов обработки записей поля на расстоянии 7 км от железной дороги постоянного тока с результатами решения прямой задачи для ГЭД: 1 — результаты обработки экспериментальных данных; 2—4 — результаты решения прямой задачи для ГЭД: 2 — при $\rho_2 = 500 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $T_2 = 2 \cdot 10^5 \text{ Ом}\cdot\text{м}^2$, 3 — при $\rho_2 = 1 \cdot 100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $T_2 = 4,4 \cdot 10^5 \text{ Ом}\cdot\text{м}^2$, 4 — при $\rho_2 = 5 \cdot 000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $T_2 = 2 \cdot 10^6 \text{ Ом}\cdot\text{м}^2$

ного ЧЗ для модели В (рис. 3). Очевидно, что мы имеем дело не с магнито-теллурическим импедансом, а с импедансом поля железной дороги.

Решая прямую задачу для заземленного электрического диполя, можно интерпретировать данную кривую кажущегося сопротивления. В качестве базовой выбрана модель, полученная по результатам подбора неискаженных кривых МТЗ в исследуемом районе: первый слой — мезозойские отложения с сопротивлением 10 Ом·м и мощностью 150 м; второй — карбонатные породы карбона и девона мощностью 400 м; третий — проводящие отложения среднего девона сопротивлением 1,3 Ом·м и мощностью 580 м; четвертый — кристаллический фундамент высокого сопротивления (1000 Ом·м). На рис. 4 показаны результаты решения прямой задачи для этой модели при различном сопротивлении второго слоя. Наилучшее совпадение с экспериментом достигнуто при значении $\rho_2 = 1100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$. Точность определения ρ_2 достаточно высока, так как при небольшом изменении этого параметра теоретическая и экспериментальная кривые значительно расходятся. Полученное значение поперечного сопротивления второго слоя $T_2 = 4,4 \cdot 10^5 \text{ Ом}\cdot\text{м}^2$ хорошо согласуется с результатами интерпретации кривых ЧЗ и ДЭЗ, полученных в этом районе.

Пример использования поля железной дороги переменного тока. Рассмотрим результаты работ методом МТЗ на территории Республики Чувашия по профилю, ортогонально пересекающему железную дорогу переменного тока Москва—Казань. На рис. 5 приведены кривые кажущегося сопротивления, полученные на расстояниях 4, 6, 17 и 24 км от железной дороги. Кривые зондирования на низких частотах связаны с магнито-теллурическим полем, а на высоких (от 1 до 100 Гц) —

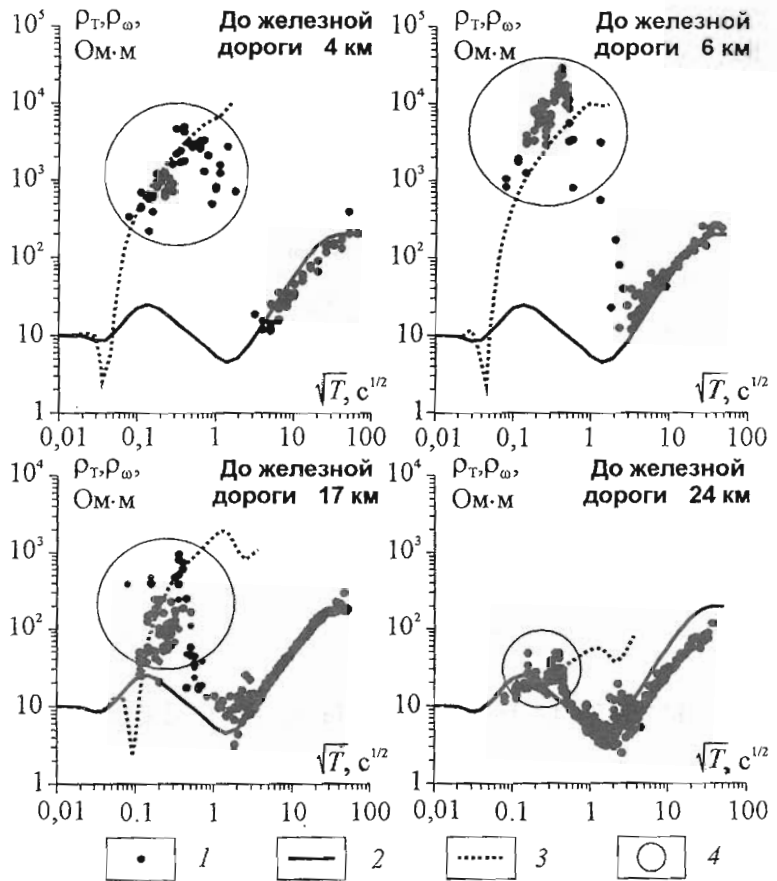


Рис. 5. Сопоставление экспериментальных кривых кажущегося сопротивления вблизи железной дороги переменного тока Москва — Казань с результатами решения прямой задачи для модели В: 1 — результаты обработки экспериментальных данных; 2—3 — результаты решения прямой задачи для модели В: 2 — в поле плоской волны, 3 — в поле ГЭД; 4 — области связанных с полем ЭЖД значений кажущегося сопротивления.

с полем ЭЖД. При интерпретации кривых МТЗ получаем модель А, а подбирая поле ЭЖД на разных расстояниях от железной дороги, определяем сопротивление второго слоя, равное 15000 Ом·м. Следовательно, мы переходим от модели А к модели В (кривые МТЗ в обоих случаях совпадают).

Выводы

1. Наиболее интенсивным источником региональных промышленных помех являются ЭЖД.
2. Поле, создаваемое ЭЖД, на достаточном расстоянии можно в первом приближении аппроксимировать полем заземленного электрического диполя.
3. При интерпретации кривых импедансного ЧЗ, полученных в поле ЭЖД, определяется поперечное сопротивление промежуточных высокоомных слоев.
4. Поперечное сопротивление высокоомных слоев несет информацию о литологии и трещиноватости горных пород, а также позволяет оценить возможности различных методов электроразведки в данном районе.
5. Проблема использования электромагнитных полей ЭЖД в электроразведке требуют дальнейшего исследования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бердичевский М.Н., Яковлев А.Г. Аналитическая модель МТ-зондирования, искаженного эффектом S // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1989. № 9.
2. Бердичевский М.Н., Яковлев А.Г. Аналитическая модель МТ-зондирования, искаженного эффектом экранирования // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1990. № 6.
3. Вишнева В.С. О возможности использования тяговой сети железной дороги в качестве детерминированного электроразведочного источника // Тез. докл. международной геофизической конференции «Электромагнитные исследования с контролируемыми источниками». СПб, 1996.
4. Изучение геологического строения Восточно-Европейской платформы геофизическими методами / Под ред. Н.В. Неволлина и др. М.: Недра, 1971.
5. Куликов В.А., Пушкарев П.Ю., Яковлев А.Г., Яковлев А.Д. Опыт частотных электромагнитных зондирований на Русской плите // Изв. вузов. Геология и разведка. 1999. № 3.
6. Пушкарев П.Ю., Яковлев А.Г., Яковлев А.Д. Программа решения прямой и обратной задачи метода частотных зондирований // Деп. в ВИНТИ 22.01.99. № 199-599.

Московский государственный университет,
Е.Д. Алексанова — аспирант
Рецензент — Д.С. Даев

УДК 550.83:622.276

В.А. ЗЫКОВ

СТАНОВЛЕНИЕ ПАРАДИГМЫ И МЕТОДОЛОГИИ ТЕХНОЭКОГЕОФИЗИКИ

Рассмотрены основные составляющие парадигмы техноэкогеофизики, представляющей собой «проблемную» группировку знаний на стыке фундаментальных и прикладных наук для обеспечения качественного прорыва в технологиях поиска, добычи и переработки минерально-сырьевых ресурсов, а также основы методологии (принципиальные идеи, методы и комплексы задач, общая структура и т.д.).

Анализ истории, современного состояния и тенденций развития разведочной геофизики, активно развивающейся системы научных дисциплин и направлений, которая постоянно совершенствует методы и расширяет сферу их практического применения, показал, что в последние годы формируется новое, перспективное научно-техническое направление. Оно развивает идеи, принципы и подходы геотехнологии [1, 2] и техногеологии [13] на основе использования очевидных преимуществ «классической» и нетрадиционной (нелинейной) геофизики и названо техноэкогеофизикой или техноэкогеофизикой (ТЭГ) [8, 9]. Она зародилась при решении специфических проблем нефтегазового дела — интенсификации добычи и повышения нефтеотдачи пластов, освоения трудноизвлекаемых и нетрадиционных ресурсов УВ — и объединяет научно-практические разработки в области дистанционного управляемого воздействия на геосреду (пласт) физическими полями разной природы с целью ее утилитарного преобразования: деструкции, избирательного извлечения полезного ископаемого, повышения нефтегазоотдачи и т.п.

Это направление пока не стало традиционным, общепризнанным в разведочной геофизике, оно только формирует и «формулирует» свои идейно-теоретические позиции (парадигму-концепцию) на «стыке» актуальных проблем горного дела, прежде всего нефтегазопромысловой геологии, нефтегазовой инженерии, геофизики, ряда других наук о Земле и технических дисциплин.

Многие вопросы, касающиеся содержания ТЭГ, в том числе ее атрибутивных базовых категорий как научной дисциплины (направления) — объектов исследования, предметной области, цели и задач, используемых средств, областей применения и т.д., определившихся разделов, отдельных аспектов развития и других, рассмотрены в [10, 12, 24]. На I Всероссийской геофизической конференции-ярмарке «Техноэкогеофизика — новые технологии извлечения минерально-сырьевых ресурсов в XXI веке», где рассмотрены важные вопросы методологии, теории, методики и практики применения методов и технологий ТЭГ, данное направление организационно-профессионально оформилось (объединилось), намечены ориентиры его дальнейшего развития [24].

В ответственный этап своего становления (самоосознания, «внешнего» признания) как науки, совпадающий с весьма противоречивым и сложным периодом системного кризиса в геофизике и российской науке в целом, важно и полезно рассмотреть ТЭГ с наиболее общих, системных категорий и позиций — «парадигмальности», методологии, концепции (идейных основ) и т.д. Это тем более оправдано, если учесть, что многие известные ученые придают этим вопросам серьезное внимание [5, 23].

Некоторые дефиниции и сущность техноэкогеофизики. Не претендуя на универсальность и терминологическую строгость, можно дать следующее развернутое определение ТЭГ [11, 24]. Техноэкогеофизика — научно-практическое направле-