# УДК

### Б.С. Светов1

САМОСОГЛАСОВАННЫЕ ЗАДАЧИ ГЕОФИЗИКИ

**Аннотация:** Большинство докладов на конференции посвящено рассмотрению различных модификаций электромагнитных методов разведки независимо от  параллельно существующих в реальной Земле других физических полей. Такой подход в некоторых ситуациях оправдывает себя, однако в общем случае он дает лишь некоторое приближение к искомому решению задачи. Более строго интерпретация наблюденных данных может быть проведена в рамках решения системысамосогласованных задач, учитывающих взаимодействие разных физических полей между собой.Каждая такая задача подобно классическим уравнениям математической физики включает в себя свое неоднородное уравнение, описывающее на макроскопическом уровне введенное поле, и уравнения связи его с другими полями. Систему таких самосогласованных задач можно рассматривать как некий аналог системы основных уравнений матфизики, приспособленный к решению задач геофизики. Обоснованию необходимости такого подхода в разведочной геофизике посвящен настоящий доклад.

**Ключевые слова:** самосогласованные задачи, физические поля в реальной геологической среде.

**Об авторах:**

1 - Институт физики Земли РАН, Москва

На конференции изолированно от других физических полей рассматриваются различные модификации электромагнитных методов разведки. Такой подход не соответствует современной геофизической науке и сдерживает ее развитие. Проведенные за последние 20-30 лет исследования свидетельствуют о взаимодействии в реальной Земле различных физических полей друг с другом. Их изолированное изучение может рассматриваться лишь как некоторое приближение к действительности. Более строго взаимодействие различных, макроскопически усредненных и связанных между собой силовых полей описывается в рамках теории самосогласованных задач геофизики. Горные породы (геологические среды) представляют собой сложно построенные пористые системы, состоящие из твердых минералов и внутрипоровой жидкости, характеризующиеся набором структурных и вещественных свойств. В таких средах под действием приложенного поля возникают и взаимодействуют между собой сторонние по отношению к приложенному полю силовые поля различной физико-химической природы. Примерами таких полей являются поля, участвующие в сейсмоэлектрических процессах [12,7], и поля вызванной поляризации среды электрокинетической или электрохимической природы [8,9]. Такие задачи включают в себя систему уравнений приложенного и сторонних полей и уравнений, связывающих эти поля между собой. Поскольку в этом случае часть энергии возбуждающего поля тратится на создание сторонних полей, нарушаются законы, считающиеся справедливыми для возбуждающего поля. Так при возбуждении электрического поля, нарушается закон Ома, а при возбуждении сейсмического поля – закон Гука.Приложенное поле, вообще говоря, не только порождает сторонние силовые поля, но может изменить структурные и даже вещественные свойства среды [3]. Такое явление может быть связано с изменением в пористых средах содержания флюида и состава растворенных в нем солей (эффект 1 рода). Кратко остановимся на наиболее проработанных самосогласованных задачах геофизики: сейсмоэлектрики, ограничившись эффектом 2 рода, и вызванной поляризации, частично опуская ранее опубликованные математические подробности.

**1. Вызванная поляризация геологической среды**

При включении электрического поля в поляризующейся среде мгновенно (со скоростью распространения ЭМ поля) устанавливается распределение напряженности электрического поля, соответствующее первоначально неполяризованной среде (рис. 1а). Под действием приложенного электрического поля возникает электрический ток. В вязкой поровой жидкости перенос зарядов осуществляется посредством электроосмоса. При электроосмосе ионы поровой жидкости под действием электрического поля приходят в движение и увлекают за собой саму жидкость. Величина электроосмотического течения и тока определяется электропроводностью пористой влагонасыщенной среды, которая, в свою очередь, зависит от ее петрофизических свойств (геометрии порового пространства, свойств ионосодержащей жидкости и поверхности твердого скелета пор и т. п.). В результате электроосмотического течения на входе и выходе суженных участков поровых каналов образуются соответственно избыток и недостаток положительных зарядов (повышенная и пониженная концентрации ионов в поровой жидкости) (рис. 1б). Возникшая на суженном участке



Рис. . Повышенная и пониженная концентрации ионов в поровой жидкости

поры разность концентраций растворов приводит к появлению осмотического давления (мембранный эффект). Градиент осмотического давления создает осмотическое течение, переносящее не только ионы, но и нейтральные молекулы воды (рис. 1в). Это течение, создаваемое независящими от электрического поля силами осмотического давления (закон Дарси), в первом приближении не замечает мембранной перегородки и направлено в сторону увеличения создавшейся на ней неравномерной концентрации растворов, то есть противоположно электроосмотическому течению. На больших временах (в стационарном состоянии) эти течения уравновешивают друг друга (рис. 1г). После выключения возбуждающего электрического поля, возникшие на мембранных перегородках, перепад осмотического давления и накопленные заряды релаксируют и приводят к синхронному спаду электрического поля ВП. Для вязкой несжимаемой жидкости можно, используя формулу Гельмгольца-Смолуховского, найти значение скорости электроосмотического течения, величину стороннего тока и коэффициент поляризуемости [1].

Зависимость поля от времени установления поля ВП может быть найдена при пренебрежении конвекцией жидкости и решении краевой задачи для уравнения диффузии с заданными из решения стационарной задачи начальными условиями. Аналитические решения задачи диффузии жидкости в пористой среде находятся лишь в достаточно простых ситуациях. Так, например, решение одномерной задачи диффузии в поровом цилиндрическом канале с периодически изменяющимся диаметром и заданными начальными условиями (модель Фридрихсберга – Сидоровой – Кормильцева - Титова) имеет вид [5,10,11]:

 (1).

Здесь: , , *D* – коэффициент диффузии жидкости, *l*1, *l*2– длины широкой и узкой частей канала. Решение представляет собой сумму экспоненциально затухающих слагаемых, показатели которых зависят от петрофизических параметров среды. Стационарное значение и скорость установления поля ВП зависят от размеров и формы пор, коэффициента диффузии поровой жидкости, вещества скелета и т. д. Время установления поляризации определяется временем формирования сторонних по отношению к электрическому полю осмотических токов, связанных с перемещением вещества (жидкости). Это определяет важную особенность установления поля ВП: оно многократно превышает время электродинамического становления ЭМ поля в горной породе. В установившемся (стационарном) режиме и в предположении стационарности и линейности процесса поляризации самосогласованное поле электрокинетического происхождения может быть описано математически [8, 9].

**2. Сейсмоэлектрическое самосогласованное поле**

Теоретическую базу, на которой основана классическая сейсморазведка и акустический каротаж, составляло и составляет, в основном, до сих пор уравнение распространения упругих волн в сплошных средах – уравнение Ламе. В частотной области () и для изотропных сред оно записывается в форме:

 (2)

Здесь: ***u*** – вектор смещения среды,  и *μ* – параметры Ламе (*μ* – модуль сдвига, *K* – модуль всестороннего сжатия). Решение этого уравнения в однородной среде представляет собой сумму двух упругих волн: продольной (потенциальной) и поперечной (вихревой).

В 1956 году М. Био в своей основополагающей статье [13] развил эту теорию и сформулировал свои широко известные уравнения, описывающие распространение упругих волн в двухфазной – пористой влаго- (или газо-) насыщенной среде, являющейся более адекватной моделью горной породы. Решение уравнений Био в однородной среде выражается в виде суммы трех волн: одной поперечной и двух продольных («медленной» и «быстрой»). Динамические и кинематические характеристики этих волн зависят, как это следует из уравнений, не только от модулей упругости и плотностей жидкой и твердой фаз, но и от петрофизических параметров среды, прежде всего, от ее пористости и проницаемости. Это открыло новые информационные возможности перед сейсморазведкой и, особенно, перед акустическим каротажем. Из уравнений Био следует, что поровая жидкость движется не синхронно с твердой фазой, а отстает от нее. В результате возникает поток жидкости относительно твердого скелета породы. Избирательная адсорбция ионов из порового раствора твердым скелетом горной породы приводит к тому, что ее жидкая и твердая фазы оказываются противоположно заряженными, поэтому их относительное движение создает сторонний электрический ток плотности . Этот ток порождает ЭМ поле. В этом – физическая суть сейсмоэлектрического эффекта электрокинетической природы.

В 1994 году С. Прайд в статье [12] более адекватно описал это явление с помощью самосогласованной системы уравнений, объединяющей уравнения Био и Максвелла:

  ,  (3)

Здесь  - комплексная электропроводность среды, Связующую роль между уравнениями Био и Максвелла играет представление для стороннего тока. Оно следует из термодинамических соотношений Онзагера:

 (4),

здесь: , . Величина *Z* имеет смысл частотно зависимого электрокинетического коэффициента, поскольку он определяет сторонний электрический ток, порождаемый потоком поровой жидкости. В нем заключена основная информация о среде, которую несет в себе ЭМ поле электрокинетического происхождения.

Описанные выше задачи вызванной поляризации и сейсмоэлектрики являются важными, но все же частными примерами самосогласованных задач. Всякое силовое воздействие на геологическую среду нарушает ее равновесное состояние, порождает в ней эффекты 1 и 2 рода и формирует новые самосогласованные задачи. Систему таких самосогласованных задач можно рассматривать как аналог системы основных уравнений матфизики, приспособленный к решению задач геофизики. Приведем некоторые дополнительные примеры таких задач. Бурение скважин [6] нарушает существующие в недрах Земли гидродинамические связи и устанавливает новые. Проявляющаяся при бурении разность между литостатическим и гидростатическим давлениями приводит к возникновению потоков жидкости в скважину. Эти потоки порождают электрическое поле, которое измеряется в методе спонтанного каротажа. Исходя из концепции самосогласованного поля, можно представить себе появление новых геофизических методов, основанных на еще неиспользуемых способах нарушения равновесного состояния среды. Можно, например, использовать бурящиеся скважины для регулируемой посылки в около скважинную среду водных потоков или изменения в ней давления. Можно использовать наблюдаемые в реальной геологической среде и отличающиеся от закона Ома функциональные связи между плотностью тока и напряженностью электрического поля [4]. Можно изучать геотермические задачи, используя их зависимость от нагревания среды. Фантазия здесь ограничивается только технологическими возможностями.

**Библиографический список**

1. Духин С.С. Электропроводность и электрокинетические свойства дисперсных систем. Киев, «Наукова думка», 1975, 242 с.

2. Иванов А. Г. Сейсмоэлектрический эффект 2 рода.// Известия географических и геофизических наук, 1940, №5, С. 600 – 727

3. Иванов А.Г. 1940,1, Сейсмоэлектрический эффект первого рода в приэлектродных областях: Докл. АН СССР. 68, 53-56.

4. Казначеев П.А., Камшилин А.Н., Попов В.В. Измерение локальной плотности тока в земной коре // Вестник МЭИ. - 2011. - № 5. - С. 57-63.

5. Кормильцев В.В. Вызванная поляризация в уравнениях электродинамики. // Свердловск, УНЦ АН СССР, 1981, 44 с

6. Мясников А.В. Принципы построения самосогласованных гидро-геомеханических моделей для описания многофазных физических процессов в пласте и скважине. //Лекция на школе – семинаре «Петрофизика осадочных пород 2013»

7. Светов Б.С. К теоретическому обоснованию сейсмоэлектрического метода геофизической разведки// Геофизика, 2000, № 1, **С.**28 – 39

8. Светов Б.С., Агеев В.В., Каринский С. Д., Агеева О. А. Самосогласованная задача вызванной поляризации электрокинетического происхождения.//Физика Земли, 2013, №6, сс. 91 – 98.

9. Светов Б.С. Самосогласованные задачи геофизики. Обзор. // Физика Земли (в печати)

10. Титов К.В., Тарасов В.А. Временные характеристики вызванной поляризации в водонасыщенных песках: теория и эксперименты // Геология и разведка, 2001, т. 42, № 6, C. 988-995

11. Фридрихсберг Д.А., Сидорова М.П. Исследования связи явления вызванной поляризации с электрокинетическими свойствами капиллярных систем // Вестник ЛГУ. Сер. Химия, 1961, № 4, с. 222-226.

12. Pride S.R.Governing equations for the coupled electromagnetics and acoustics of porous media // Phys. Review. B. 1994, V. 50, p. 15678-15696

13. Biot M. A. Theory of propagation of elastic waves in a fluid saturated porous soljds//J. Acoust. Soc. Am. vol. .28, pp 168-186.

**B.S. Svetov**

**SELF-CONSISTENT PROBLEM OF GEOPHYSICS**

**Abstract:** Most of the reports at the conference devoted to the consideration of various modifications of electromagnetic methods of prospecting, regardless of coexisting in the real world of other physical fields. This approach, in some situations, is justified, but in general it provides only an approximation to the desired solution. A stricter interpretation of the observed data can be carried out within the framework of solving the system of self-consistent problems, taking into account the interaction of different physical fields together. Each task is similar to the classical equations of mathematical physics includes its non-homogeneous equation, which describes the macroscopic level, entered the field and equations relating it to other fields. The system of self-consistent problems can be regarded as a kind of analogue of the system of equations of mathematical physics major, adapted to the solution of problems of geophysics. Justification of the necessity of such an approach in exploration geophysics subject of this report.

**Keywords:** self-consistent problem, physical fields in a real geological environment.