

## ИЗУЧЕНИЕ АНИЗОТРОПИИ ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ ПРОВОДИМОСТИ С ПОМОЩЬЮ АЗИМУТАЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ В МЕТОДЕ ЕСТЕСТВЕННОГО ПОЛЯ

Шевнин В.А., Ерохин С.А., Павлова А.М. (МГУ им. М.В.Ломоносова)

### Аннотация

Рассмотрена новая методика изучения анизотропии гидравлических свойств пород по азимутальным измерениям ЕП, предложенная в работах D.N. Wishart и L. Slater для трещиноватых пород, и проверенная на рыхлых песчано-глинистых породах поймы реки. Азимутальные диаграммы ЕП позволяют судить о направлении фильтрации подземных вод и могут дополнять традиционные азимутальные измерения анизотропии сопротивлений.

### Введение

Для изучения азимутальной анизотропии сопротивления среды традиционно применяется метод кругового электропрофилирования. Теоретическое решение задачи о поле точечного источника на поверхности анизотропной среды в России было, видимо, впервые получено С.М. Шейнманном [Бурсиан, 1933, 1972], а за рубежом получено в фирме Шлюмберже [Maillet and Doll, 1933; Schlumberger et al., 1934].

Причиной анизотропии сопротивления может быть тонкая слоистость, трещиноватость или ориентированная зернистость. По количеству публикаций за рубежом, наибольшее внимание привлекает анизотропия трещиноватости [Taylor and Fleming, 1988], что связано с важностью информации о трещиноватости для гидрогеологии, как структур, благоприятных для нахождения и движения подземных вод.

В работе Lane et al. [1995] приводится формула, связывающая анизотропию трещиноватости с трещинной пористостью и проводимостью влаги в породе. Трещинную пористость, в свою очередь, можно связать с коэффициентом фильтрации, но препятствием на этом пути является вопрос о возможной кольматации трещин глиной.

Одной из первых работ, где рассматривались возможности отличия открытых и кольматированных глиной трещин с помощью азимутальных измерений вызванной поляризации, была работа Шарапанова и др. [1978].

По анизотропии сопротивления и разным методикам ее измерения существует обширная отечественная и зарубежная литература, а вот оценка анизотропии гидравлических свойств пород по данным ЕП отличается существенной новизной.

При фильтрации воды через пористую геологическую породу возникает разность потенциалов [Семенов, 1980; Комаров, 1994]:

$$\Delta U_a = \frac{\xi \varepsilon \rho}{4\pi \eta} \Delta P$$

где  $\varepsilon$  - абсолютная диэлектрическая проницаемость раствора,  $\rho$  - удельное сопротивление раствора,  $\xi$  - дзета-потенциал,  $\eta$  - вязкость,  $\Delta P$  - разность давлений. В системе СИ  $\Delta U_a$  и  $\xi$  выражены в вольтах или милливольтгах,  $\rho$  - в Ом метрах,  $\Delta P$  - в паскалях,  $\eta$  - в паскаль-секундах;  $\varepsilon_{\text{отн}} = \varepsilon$ . Для водных растворов  $\varepsilon = 80$ ;  $\eta = 0.01$  пуаза (в СГС) или 0,1 Па.с (в СИ);  $\xi$  - потенциал для силикатных пород, в среднем, составляет +(20...50) мВ; удельное сопротивление меняется от 5 до 100 Ом.м и более.

Вместо разности давлений  $\Delta P$  на практике удобнее использовать скорость движения жидкости  $V$ :

$$E_a = \frac{8\xi\varepsilon_0\varepsilon_{\text{отн}}\rho\pi}{r^2} V$$

Фильтрационное поле прямо пропорционально скорости движения воды в породах  $V$  и удельному сопротивлению воды  $\rho$ . Одновременно оно обратно пропорционально квадрату радиуса пор, т.е. площади сечения капилляров. Радиус пор меняется в довольно широких пределах от  $10^{-8}$  м у глин до  $10^{-4}$  м у песков. В пласте, по которому течет вода, положительный потенциал возрастает в направлении движения воды. Фильтрационное поле может составлять от 10 мВ/м вблизи горных ледников до десятых долей мВ/м в средней полосе России. В долине реки потенциал обычно возрастает в направлении ее течения. Градиент потенциала достигает десятых долей мВ/м. В прирусловой части поперек реки потенциал возрастает по направлению к реке, дренирующей

грунтовые воды. Градиент потенциала в прирусловых местах иногда достигает единиц милливольт на метр [Семенов, 1980].

### 1. Работы Д.Н. Вишарт и Л. Слейтер.

В США в университете Рутгерса аспирант Дебонна Натали Вишарт и ее руководитель профессор Ли Слейтер провели изучение возможностей азимутальных измерений над зонами трещиноватости с помощью методов сопротивлений и естественного электрического поля (АИЕП). Их результаты оказались весьма интересными.

В этой работе для метода сопротивлений применялась стреловидная установка, используемая для изучения анизотропии благодаря ее высокой чувствительности к анизотропии [Bolshakov et al., 1998], но, главное, была предложена система азимутальных измерений градиента ЕП (АИЕП) с шагом  $20^\circ$ . Исследования показали, что измерения АИЕП представляют собой быстрый, простой и недорогой способ оценки гидравлической анизотропии трещиноватых сред [Wishart et al., 2006].

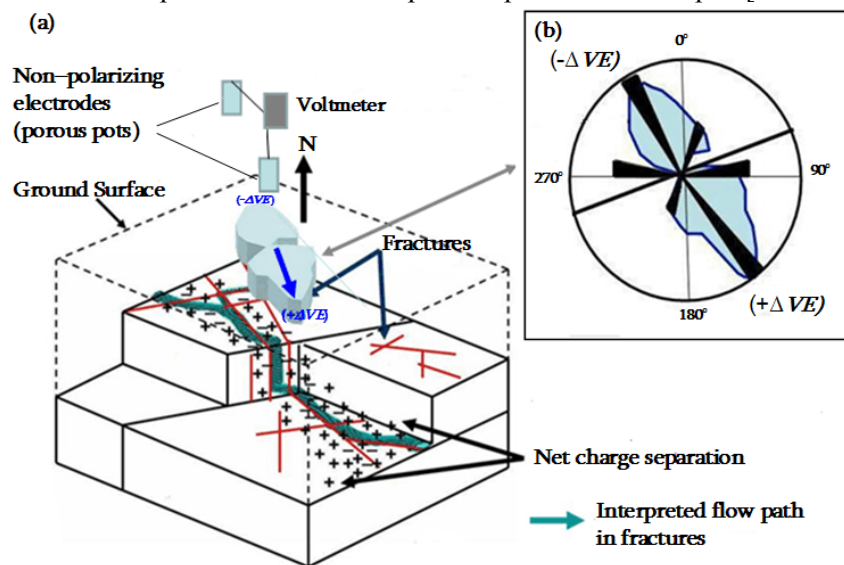


Рис.1. Модель трещиноватой среды из бетона с прокачкой воды.  
По Д.Н.Вишарт.

Для проверки методики оценки гидравлической анизотропии была разработана и построена лабораторная модель трещиноватого массива из бетона с регулируемой скоростью фильтрации воды (Рис.1).

Для улучшения измерений с помощью неполяризующихся электродов, устанавливаемых на поверхности, модель была засыпана сверху песком (на 3 см выше кровли бетона) и насыщена пресной водой. Вода прокачивалась через модель с различной скоростью (Рис.2).

Использовались неполяризующиеся электроды  $PbCl-PbCl_2$  [Petiau, 2000].

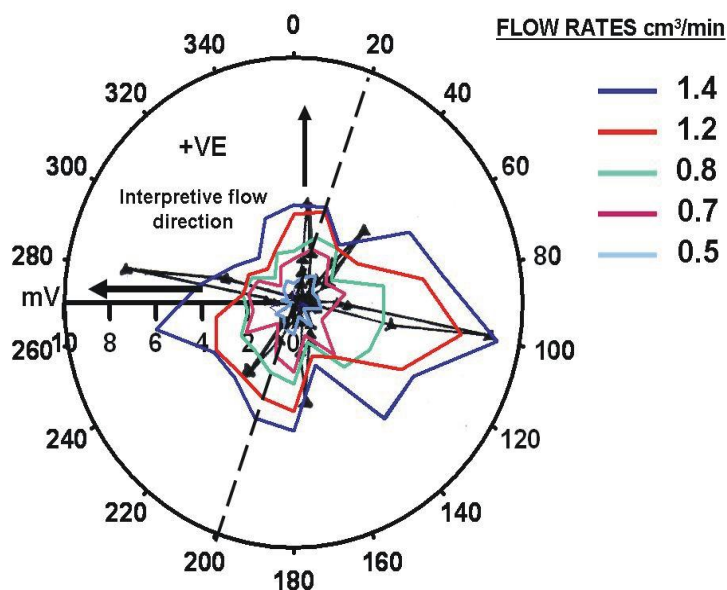


Рис.2. Азимутальные диаграммы ЕП для разных скоростей фильтрации. По Д.Н.Вишарт. Справа указаны скорости фильтрации в  $\text{см}^3/\text{мин}$ .

Величины сигналов ЕП при измерении на этой модели достигали 3-9 мВ (Рис.2).

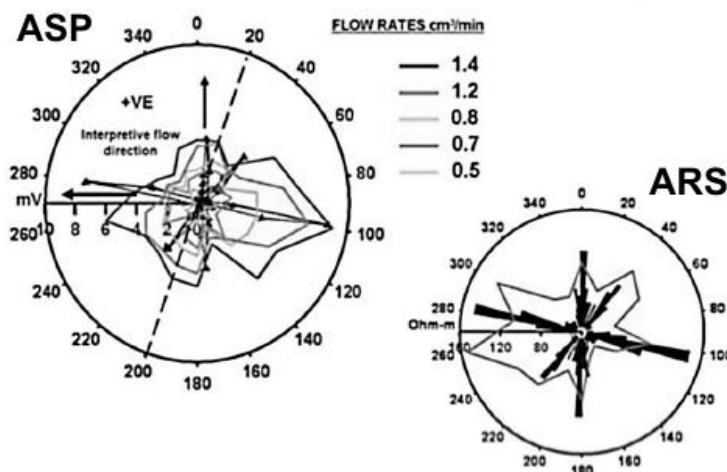


Рис.3. Сравнение азимутальных диаграмм ЕП (слева), сопротивления (справа) и диаграмм трещиноватости (сплошная заливка справа). Модель с Рис.1. По Д.Н.Вишарт.

Эти исследования показали, что диаграммы АИЕП лучше совпадают с диаграммами трещиноватости, построенным по геологическим наблюдениям, и имеют в этом преимущество перед диаграммами сопротивлений. Кроме того, диаграммы АИЕП выделяют те направления, по которым действительно происходит процесс фильтрации, отличая их от кольматированных глиной трещин, а метод сопротивлений эти два типа трещин не различает.

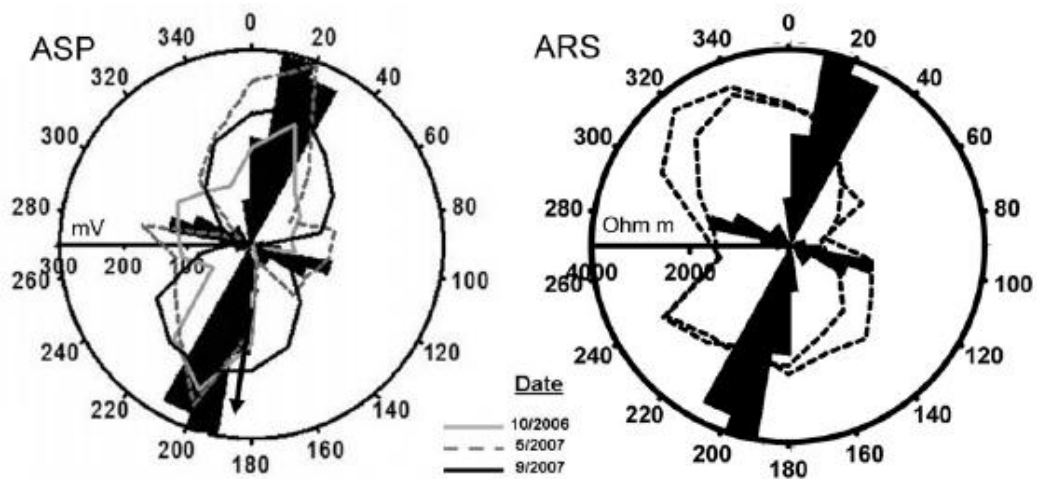


Рис.4. Сравнение азимутальных диаграмм ЕП (слева) с диаграммами сопротивлений (справа) для участка Back Beach Park в штате Нью Джерси. Сплошной заливкой показана диаграмма трещиноватости. По Д.Н.Вишарт.

Мощность наносов на данном участке - 7 м, ниже находятся трещиноватые кристаллические породы, выходящие на поверхность в 100 м от места измерения, где были замерены азимуты трещин. Разнос электродов MN при измерении градиента ЕП был 20 м. Дрейф электродного потенциала не превышал 0.2 мВ/день и проверялся в течении трех недель до начала полевых измерений. Из рис.4 видно, что диаграммы АИЕП лучше коррелируют с диаграммами трещиноватости, чем диаграммы сопротивления. Сигналы ЕП достигают 200-300 мВ, кажущиеся сопротивления 2000-3000 Ом.м.

По расчету спектра азимутальных диаграмм отношение О/Е (суммы нечетных к сумме четных гармоник спектра диаграмм ЕП) равно 0.5 (преобладает влияние анизотропии) [Перваго, 1998]. По спектрам азимутальных диаграмм сопротивления, по результатам Д.Н.Вишарт, в 3 из 4 мест полевых работ в штате Нью Джерси неоднородность преобладала над анизотропией, а по спектрам диаграмм ЕП преобладало влияние анизотропии, которая была ясно видна в 3 из 4 мест. Д.Н.Вишарт сделала вывод, что АИЕП имеют лучшее разрешение по направлению фильтрации, чем сопротивление [Wishart et al., 2008].

## 2. Результаты азимутальных измерений ЕП на базе геофизической практики МГУ в Калужской области в 2011 г.

### Точка измерения анизотропии ЕП-1



Рис.5. Карта фактического материала. Показана азимутальная система наблюдений (круг) и выявленное направление фильтрации (стрелка)

Для азимутальных измерений ЕП была размечена круговая площадка вблизи реки Воря у купальни (Рис. 5) с радиусом окружности 7.5 м и шагом по углу  $15^\circ$  (24 луча). После выбора пары неполяризующихся электродов ВИРГ (медь в растворе медного купороса) с наименьшей разностью потенциалов, неподвижный электрод (N) был установлен в центре круга, а подвижный электрод (M) двигался по окружности с углом поворота  $15^\circ$ . В измеренные значения вносилась поправка за электродную разность потенциалов и за изменение поля ЕП на первой точке профиля. Для контроля измерения были повторены дважды и обработаны независимо, а потом осреднены. Полученная азимутальная диаграмма показана на рис.6. Направление большой оси диаграммы согласно Д.Н.Вишарт показывает направление фильтрации. Наши измерения отличались от Вишарт тем, что она вела наблюдения фильтрации в трещиноватых породах, а мы в рыхлых осадочных породах на пойме реки (пески и суглинки). Вишарт перемещала оба электрода М и N (азимутальные измерения градиента ЕП), у нас один электрод был неподвижен и находился в центре (измерения потенциала), а перемещался другой электрод. Различались и длины MN: 20 и 7.5 м, и принимаемые сигналы 200-300 мВ и 3-4 мВ. Максимальная напряженность электрического поля у нас составила 0.6 мВ/м.

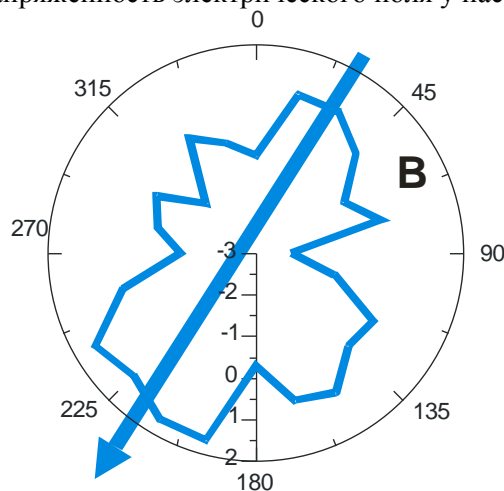


Рис.6. Азимутальная диаграмма ЕП АИЕП-1 и направление фильтрации

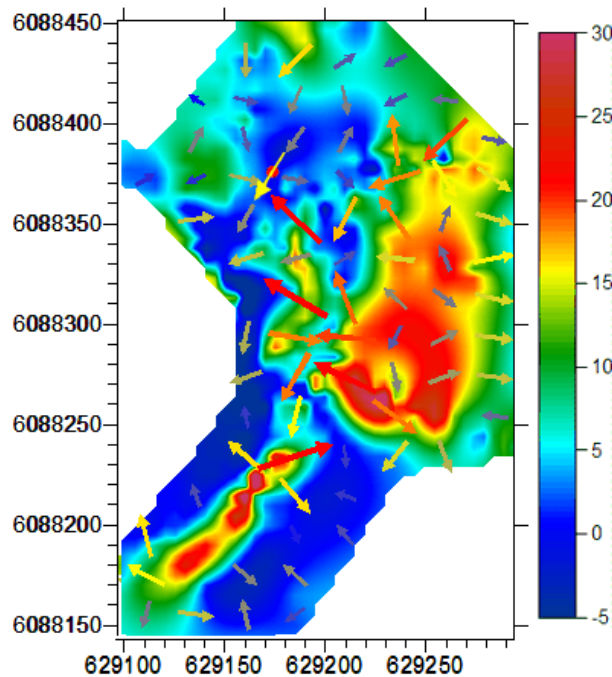


Рис.7. Фрагмент карты ЕП с направлениями градиента. В точке измерения анизотропии (красная) направление градиента совпадает с направлением азимутальной диаграммы.

На рис. 5 и 6 стрелкой показан азимут фильтрации. В районе родника у купальни этот азимут вполне вероятно отражает фильтрацию и согласуется с очертанием аномалий ЕП и с возможными путями фильтрации из флювиогляциальных песков, выраженных в рельефе (лес), в сторону реки. Направление стрелки совпадает со старым руслом (слева от стрелки, Рис.5) и со склоном холма, поросшего лесом (справа). Не исключено, что резкий разворот старого русла и современного русла р. Вори на  $90^\circ$  (с ЮВ на ЮЗ) связан с тектоническими причинами.

Сопротивление воды в роднике вблизи точки ЕП-1 равно 40 Ом.м, в реке Воря - 30 Ом.м. Невысокие сопротивления воды и низкие скорости фильтрации создают слабые аномалии ЕП. Средние кажущиеся сопротивления на пойме - 50-70 Ом.м, что соответствует супеси.

Анализ спектра этой азимутальной диаграммы, выполненный с помощью программы AnisHarm [Перваго, 1998; Пакет программ... 1999], показал, что коэффициент кажущейся анизотропии равен 1.4, азимут простирания  $27^\circ$ - $207^\circ$ , погрешность оценки азимута  $9^\circ$  и отношение суммы нечетных к сумме четных гармоник спектра равно 0.58. Когда это отношение меньше единицы, то влияние анизотропии преобладает над влиянием неоднородностей.

Альтернативой азимутальным измерениям ЕП может быть съемка карты потенциала и построение градиентов (стандартная операция программы Surfer). На рис.7 показан фрагмент карты ЕП, снятой в 2008-2011 гг. в ходе практики студентов с нанесенными направлениями градиентов. Цвет стрелок векторов связан с их амплитудой, синие стрелки - минимум градиента, красные - максимум. Длина стрелок также связана с их амплитудой. Красный круг с желтой стрелкой - это точка анизотропии ЕП - 1. Направление стрелки анизотропии ЕП совпадает с направлением градиента. Это сходство, может быть, даст возможность прогнозировать потоки фильтрации строя вектора градиентов ЕП. Измерения анизотропии ЕП не противоречат карте потенциала ЕП и векторам градиентов. Пока неясно, что лучше, азимутальные измерения ЕП или картирование потенциала ЕП? Шаг между точками измерения потенциала ЕП при картировании составлял 10-20 м и более. Расстояние между точками измерения потенциала на дуге окружности радиусом 7.5 м для шага по азимуту в  $15^\circ$  примерно равен 2 м.

### Точка измерения анизотропии ЕП-2

Эта точка находится также на пойме реки Вори в 100 м к СЗ от первой точки АИЕП-1, также вблизи палеоруслу р. Вори.

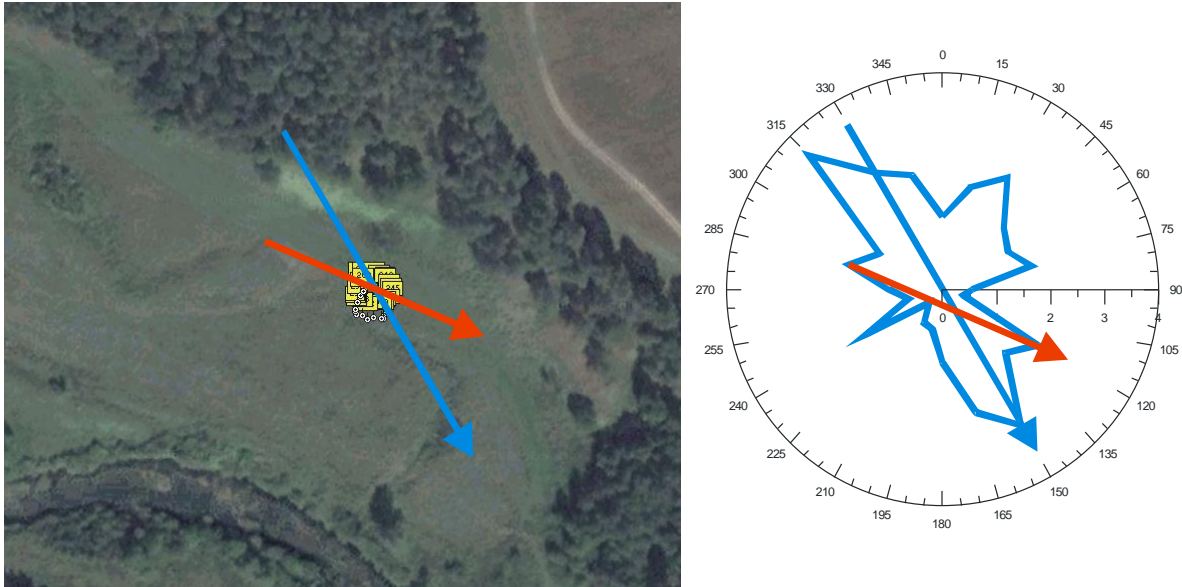


Рис.8. Точка анизотропии ЕП - 2 на пойме р. Вори. Слева положение точки на карте, справа - азимутальная диаграмма ЕП АИЕП-2.

Методика измерений на точке 2 идентична точке 1, радиус окружности 7.5 м, шаг по азимуту 15°. Красная стрелка (второстепенное направление) параллельно старому руслу (оно видно на снимке), синяя стрелка (основное направление), возможно, показывает фильтрацию подземных вод от возвышенности, сложенной песком (лес), в сторону реки (Рис.8). Анализ спектра этой азимутальной диаграммы, выполненный с помощью программы AnisHarm [Пакет программ... 1999], показал, что коэффициент кажущейся анизотропии равен 1.8, азимут простираения 150°- -30°, погрешность оценки азимута 5° и отношение суммы нечетных к сумме четных гармоник спектра равно 1.1. То есть в данном случае влияние неоднородности примерно равно или чуть больше влияния анизотропии.

### Обсуждение результатов.

После первых проверок АИЕП можно обсудить результаты. Основное впечатление такое, что методика азимутальных измерений ЕП работает. Получаемые направления предполагаемой фильтрации соответствуют здравому смыслу, геологической ситуации и рельефу. Подобные измерения следует продолжить, чтобы набрать достаточную статистику. Вместе с тем, видны очевидные трудности. Радиус окружности для азимутальных измерений в нашем случае равен 7.5 м. Выбор радиуса связан с малой глубиной фильтрующегося потока. Но и величины сигналов ЕП невелики, 1-4 мВ. Малые сигналы достаточно тяжело измеряются в ЕП (электродная разность потенциалов может достигать 1-2 мВ, ее измерения во времени (1 час) вызывает сползание на 2-5 мВ). Величины сигналов могут меняться при изменении внешних условий: после сильных дождей, после продолжительной жаркой и сухой погоды. Насколько могут влиять эти факторы на фильтрационный поток и другие условия измерения (сопротивление заземления), пока трудно сказать. Вероятно, эти факторы следует изучать с помощью периодически повторяемых наблюдений. Представляет интерес и измерение нескольких азимутальных диаграмм по профилю или площади. Пока основным препятствием являются слабые сигналы и трудоемкость работы с неполяризуемыми электродами. Серьезной проблемой является низкое качество неполяризуемых электродов ВИРГ, изготовленных в СССР 30-40 лет тому назад. Wishart применяла неполяризующиеся электроды иной конструкции и значительно более высокого качества [Petiau, 2000].

### Выводы

Была опробована методика азимутальных измерений естественного поля АИЕП, предложенная Д.Н.Вишарт и Л.Слейтер в университете Рутгерса. Первые результаты показали, что вытянутость диаграмм АИЕП не противоречит представлениям о направлении фильтрации воды в

рыхлых породах: карте ЕП этого участка, здравому смыслу, формам рельефа и геологической ситуации. Опробование методики следует продолжать.

Метод ЕП слабее метода сопротивлений в смысле помехоустойчивости, но его преимуществом является реакция на реальную фильтрацию и вероятное игнорирование закольматированных направлений трещин.

Острейшая проблема: нужны стабильные неполяризующиеся электроды, в России выпуск электродов ВИРГ прекращен, запаса на складах нет, качество того, что еще осталось, хуже, (или много хуже), чем на Западе. Можно купить западные электроды - 250-350 долларов за штуку. Есть электроды, выпускаемые в России для трубопроводов, их качество мы пока не знаем. Есть серебряные неполяризующиеся электроды для кардиографии (неудобная конструкция для наших целей, слишком миниатюрны).

## Литература

Бурсиан В.Р., 1972 (первое издание - 1933). Теория электромагнитных полей, применяемых в электроразведке. Л., Недра. 368 с.

Комаров В.А. Геоэлектрoхимия. Санкт-Петербург. Изд. СПб ун-та, 1994, 136 с.

Пакет программ по анизотропии AnisPack. М. Каф. геофизики МГУ. Инструкция к пакету программ. 1999. 9 с.

Перваго Е.В. Влияние анизотропии и неоднородностей на результаты электрических зондирований. Дисс. на соиск. уч. ст. к. ф.-м. н. М., МГУ, 1998. 83 с.

Семенов А.С. Электроразведка методом естественного электрического поля. Л.: Недра, 1980. 446 с.

Шарапанов Н.Н., Черняк Г.Я., Судоплатов А.Д. Изучение анизотропии пород методом ВЭЗ ВП. - Разведка и охрана недр, 1978, № 3, с. 40-42.

Bolshakov, D.K., Modin, I.N., Pervago, E.V., Shevnin, V.A., 1998. New step in anisotropy studies: arrow-type array. In: Proceedings of 4th EEGS-ES Meeting in Barcelona, Spain, September 1998.

Lane J.W., Haeni F.P., and Watson W.M. 1995. Use of a square-array direct-current resistivity method to detect fractures in crystalline bedrock in New Hampshire. Ground Water, 33, No. 3 May-June, 476-485.

Maillet, R. and Doll, H.G. Sur une theoreme relatif aux milieux electriquement anisotropes, et ses applications a la prospection electrique en courant continu. *Erganzungshefte fur angewandte Geophysik*, 1933, v.3, p.109-124.

Petiau, G., 2000. Second generation of lead-lead chloride electrodes for geophysical applications. *Pure and Applied Geophysics* 157, 357-382.

Schlumberger, C., Schlumberger, M., and Leonardon, E.G. Some observations concerning electrical measurements in anisotropic media and their interpretation: *Trans. AIME*, 1934, v. 110, p.159-182.

Taylor, R.W. & Fleming, A.H. 1988, Characterizing jointed systems by azimuthal resistivity surveys. *Ground Water* 26, No. 4, 464-474.

Wishart, D.N., L.D. Slater, and A.E. Gates, 2006, Self potential improves characterization of hydraulically-active fractures from azimuthal geoelectrical measurements. *Geophysics Research Letters*, **33**, 17314, doi:10.29/2006GL027092. PP. 1-5.

Wishart, D.N., L.D. Slater, D.L. Schnell, and G.C. Herman, 2009. Hydraulic Anisotropy Characterization of Pneumatic-Fractured Sediments Using Azimuthal Self Potential Gradient, *Journal of Contaminant Hydrology*, 103 (2009), 134-144.

Wishart, D. N., L.D. Slater, and A.E. Gates, 2008. Fracture anisotropy characterization in crystalline bedrock using field-scale azimuthal self potential gradient. *Journal of Hydrology*, 2008, 358, 35- 45.