УДК 550.837

В.А.ШЕВНИН, *д-р физ.-мат. наук*, *профессор*, *shevninv@rambler.ru*
С.А.ЕРОХИН, *магистр*, *аспирант*, *seroh@mail.ru*
А.М.ПАВЛОВА, *магистр*, *аспирант*, *pav_alex_88@mail.ru*
Московский государственный университет

V.A.SHEVNIN, *Dr. in phys. & math.*, *professor*, *shevninv@rambler.ru*
S.A.EROKHIN, *master*, *post-graduate student*, *seroh@mail.ru*
A.M.PAVLOVA, *master*, *post-graduate student*, *pav_alex_88@mail.ru*
Moscow State University

ИЗУЧЕНИЕ АНИЗОТРОПИИ С ПОМОЩЬЮ АЗИМУТАЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ В МЕТОДЕ ЕСТЕСТВЕННОГО ПОЛЯ

Рассмотрена новая методика изучения анизотропии гидравлических свойств пород по азимутальным измерениям в методе естественного поля (ЕП) в трещиноватых породах, предложенная в работах Д.Н.Вишардт и Л.Слейтер 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.

***Ключевые слова*:** азимутальные измерения, метод естественного электрического поля, анизотропия гидравлической проводимости.

ANISOTROPY INVESTIGATIONS WITH AZIMUTHAL SELF POTENTIAL MEASUREMENTS

New field technology for studying anisotropy of hydraulic properties in fractured rocks on azimuthal self potential (SP) measurements, developed by D.N. Wishart and L. Slater, is considered and used to study water filtration in loose grain sediments of river floodplain. Azimuthal SP diagrams allow finding direction of groundwater filtration and can add to traditional azimuthal resistivity survey.

***Key words*:** azimuthal measurements, self potential (SP), anisotropy of hydraulic conductivity.

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 в 1933 г. [1], а за рубежом в это же время в фирме Шлюмберже [6, 9].

Причиной анизотропии сопротивления может быть тонкая слоистость, трещиноватость или ориентированная зернистость. Судя по количеству публикаций за рубежом, наибольшее внимание привлекает анизотропия трещиноватости [10], что связано с важностью информации о трещиноватости для гидрогеологии.

В работе [5] 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 возможная кольматация трещин глиной.

Одной из первых работ, где рассматривались возможности отличия открытых и кольматированных глиной трещин по азимутальным измерениям вызванной поляризации, была статья [3].

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

Работы Д.Н.Вишарт и Л.Слейтер. В США в университете Рутгерса аспирантка Дебонна Натали Вишарт и ее руководитель профессор Ли Слейтер изучили возможности азимутальных измерений (АИ) над зонами трещиноватости с помощью метода сопротивлений (МС) и естественного электрического поля – АИЕП и АИМС. Их результаты оказались весьма интересными.

В работе применялась стреловидная установка метода сопротивлений, используемая благодаря ее высокой чувствительности к анизотропии для изучения последней [7], и была предложена система азимутальных измерений градиента ЕП с шагом 20°. Исследования показали, что измерения АИЕП представляют собой быстрый, простой и недорогой способ оценки гидравлической анизотропии трещиноватых сред [11].

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 песком (3 см выше кровли бетона) и насыщена пресной водой. Вода прокачивалась через модель с различной скоростью (рис.2). Использовались неполяризующиеся электроды $PbCl–PbCl_2$ [8].

Значения сигналов ЕП при измерении на этой модели достигали 9 мВ (рис.2).

Эти исследования показали, что диаграммы АИЕП лучше совпадают с диаграммами трещиноватости, построенными по геологическим наблюдениям, и имеют в

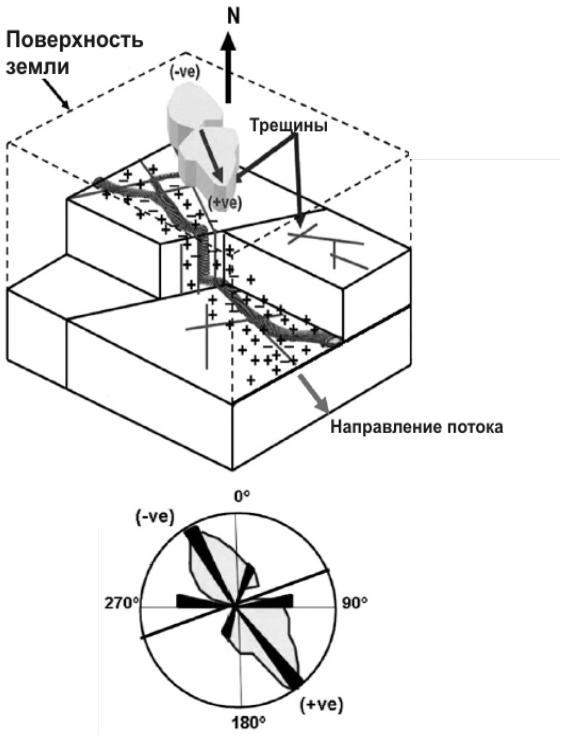


Рис.1. Модель трещиноватой среды из бетона с прокачкой воды, по Д.Н.Вишарт

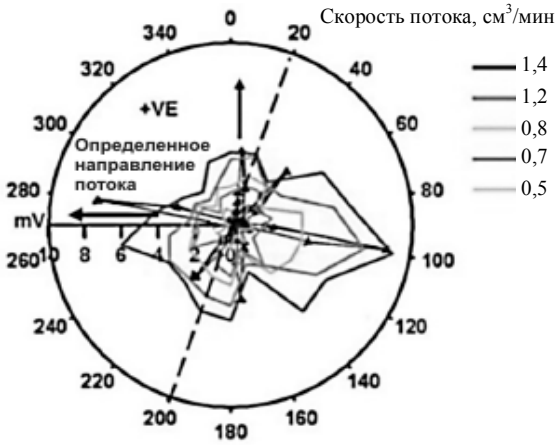


Рис.2. Азимутальные диаграммы ЕП для разных скоростей фильтрации, по Д.Н.Вишарт

этом преимущество перед диаграммами сопротивлений (рис.3). 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.

Мощность наносов на данном участке 7 м, ниже находятся трещиноватые кристаллические породы, выходящие на поверх-

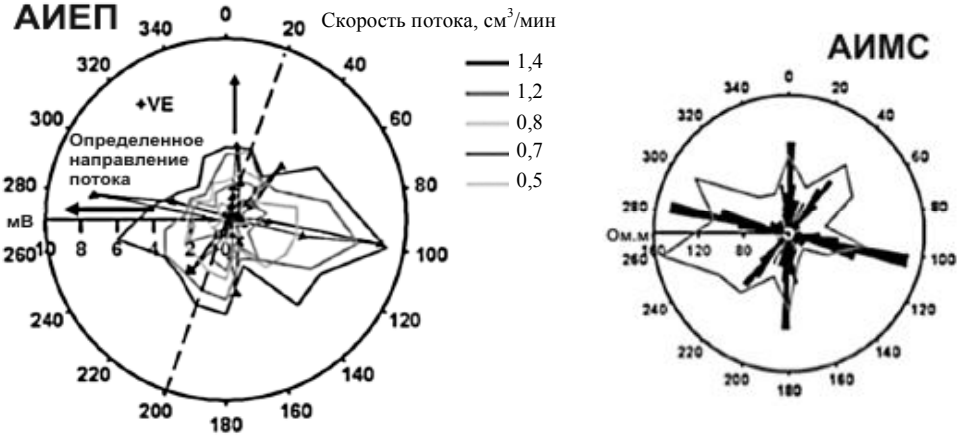


Рис.3. Сравнение азимутальных диаграмм ЕП, сопротивления и диаграмм трещиноватости (сплошная заливка справа), модель с рис.1, по Д.Н.Вишарт

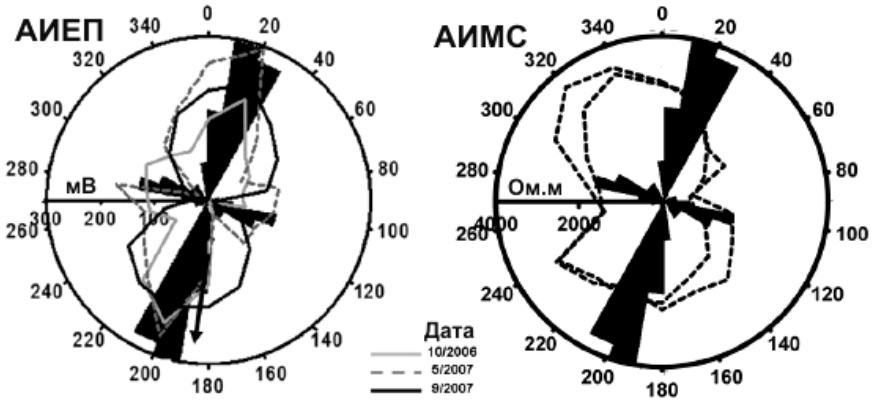


Рис.4. Сравнение азимутальных диаграмм ЕП с диаграммами сопротивлений для участка в штате Нью Джерси. Сплошной заливкой показана диаграмма трещиноватости, по Д.Н.Вишарт

ность в 100 м от места измерения, где были замерены азимуты трещин. Разнос электродов *MN* при измерении градиента ЕП 20 м. Дрейф электродного потенциала не превышал 0,2 мВ/день и проверялся в течение трех недель до начала полевых измерений. Из рис.4 видно, что диаграммы АИЕП лучше коррелируют с диаграммами трещиноватости, чем диаграммы сопротивления. Сигналы ЕП достигают 300 мВ, кажущиеся сопротивления 3000 Ом·м. Отношение О/Е (суммы нечетных к сумме четных гармоник спектра диаграмм ЕП) равно 0,5 (преобладает влияние анизотропии). По спектрам азимутальных диаграмм сопротивления, по результатам Д.Н.Вишарт, в трех из четырех мест полевых работ в штате Нью Джерси неоднородность преобладала над анизотропией, а по спектрам диаграмм ЕП преобладало влияние анизотропии, которая была ясно видна в трех из четырех мест. Д.Н.Вишарт сделала вывод, что АИЕП имеют лучшее разрешение по направлению фильтрации, чем сопротивление [4].

Результаты азимутальных измерений ЕП на базе геофизической практики МГУ в Калужской области в 2011 г. *Точка измерения анизотропии Т-1*. Для азимутальных измерений ЕП была размечена круговая площадка Т1 вблизи р. Воря у купальни (рис.5) с радиусом окружности 7,5 м и шагом по углу 15° (24 луча).

После выбора пары неполяризующихся электродов (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°. В измеренные значения вносилась поправка за электродную разность

потенциалов и за изменение поля ЕП на первой точке профиля. Для контроля измерения были выполнены 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 работ 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 *M* и *N* (азимутальные измерения градиента ЕП), у нас один электрод был неподвижен и находился в центре (измерения потенциала), а перемещался другой электрод.

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 песков, выраженных в рельефе (лес), в сторону реки. Направление стрелки совпадает со старым руслом (слева от стрелки) и со склоном холма, поросшего лесом (справа). Не исключено, что резкий разворот старого русла и современного русла на 90° вблизи этой точки связан с тектоническими причинами.

Сопротивление воды в роднике вблизи точки 1 равно 40 Ом·м, в р.Воря – 30 Ом·м. Невысокие сопротивления воды и низкие скорости фильтрации создают слабые аномалии ЕП. Среднее сопротивление грунта на пойме 70 Ом·м.

Анализ спектра этой азимутальной диаграммы, выполненный с помощью программы AnisHarm [2], показал, что коэффициент кажущейся анизотропии равен 1,4, азимут простирания 27-207°, погрешность оценки азимута 9° и отношение суммы нечетных к сумме четных гармоник спектра равно 0,58. Известно, что, когда это отношение меньше единицы, влияние анизотропии преобладает над влиянием неоднородностей.

Точка измерения анизотропии Т-2. Эта точка находится также на пойме р. Вори в 100 м к северо-западу от первой точки Т-1 (рис.7).

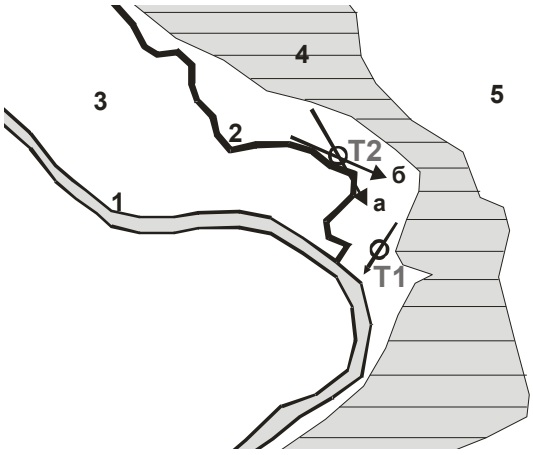


Рис.5. Схема мест измерения ЕП
Т1 и Т2 – точки азимутальных измерений ЕП и выявленные направления фильтрации (стрелки); 1 – современное русло реки; 2 – палеорусло; 3 – пойма; 4 – склон высотой 10-15 м, поросший лесом; 5 – поле на возвышенности

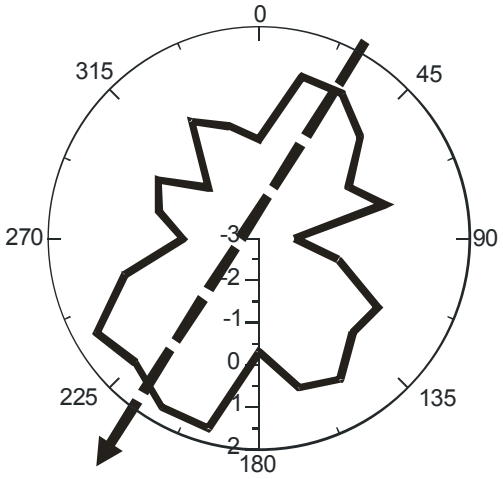


Рис.6. Азимутальная диаграмма ЕП в Т-1 и направление фильтрации

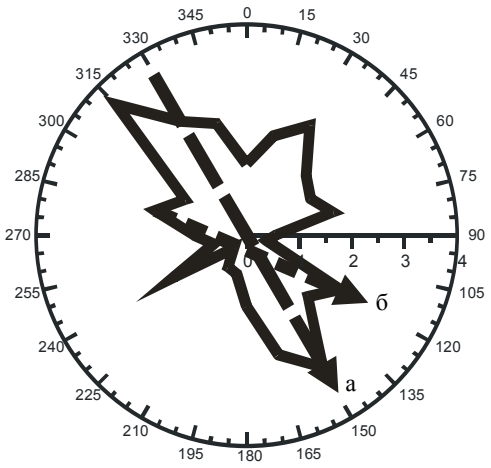


Рис.7. Точка анизотропии ЕП Т-2; положение точки см. рис.5; стрелки – направления осей диаграммы

Стрелка «б» (второстепенное направление) параллельна старому руслу (оно показано на рис.5), стрелка «а» (основное направление), возможно, показывает фильтрацию подземных вод от возвышенности, сложенной песком (лес), в сторону реки. Анализ спектра этой азимутальной диаграммы, выполненный с помощью программы AnisHarm, показал, что коэффициент кажущейся анизотропии равен 1,8, азимут простирания изменяется от 150 до –30°, погрешность оценки азимута 5° и отношение суммы нечетных к сумме четных гармоник спектра равно 1,1. Следовательно, 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 достаточные статистические данные. 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 значения сигналов ЕП невелики (1-4 мВ). Малые сигналы достаточно тяжело измеряются в ЕП (электродная разность потенциалов может достигать 2 мВ, ее измерения во времени (1 ч) вызывает сползание на 2-5 мВ). Значения 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), трудно сказать. Это 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 неполяризующимися электродами.

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. Опробование методики следует продолжать.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Бурсиан В.Р.* Теория электромагнитных полей, применяемых в электроразведке. Л.: Недра, 1972. 368 с.

2. *Перваго Е.В.* Влияние анизотропии и неоднородностей на результаты электрических зондирований: Автореф. дис... канд. физ.-мат. наук. М.: Изд-во МГУ, 1998. 23 с.

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

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

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

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

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

8. *Petiau G.* Second generation of lead–lead chloride electrodes for geophysical applications // Pure and Applied Geophysics. 2000. 157. P.357–382.

9. *Schlumberger C.* Some observations concerning electrical measurements in anisotropic media and their interpretation / C.Schlumberger, M.Schlumberger and E.G.Leonardon // Trans. AIME. 1934. V.110. P.159-182.

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

11. *Wishart D.N.* Self potential improves characterization of hydraulically-active fractures from azimuthal geoelectrical measurements / D.N.Wishart, L.D.Slater and A.E.Gates // Geophysics Research Letters. 2006. 33, 17314, doi: 1029/2006GL027092. P. 1-5.

REFERENCES

1. *Bursian V.R.* (first edition 1933). Theory of electromagnetic fields used in electrical prospecting. Leningrad: Nedra, 1972. 368 p.

2. *Pervago E.V.* Influence of anisotropy and inhomogeneity on results of electrical sounding: Research Paper … PhD phys. & math. sc. Moscow: MSU. 1998. 83 p.

3. *Sharapanov N.N.*, *Chernyak G.Ja.*, *Sudoplatov A.D.* Study of rocks anisotropy with VES-IP method // Razvedka y okhrana nedr. 1978. N 3. P. 40-42.

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

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

6. *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.

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

8. *Petiau G.* Second generation of lead–lead chloride electrodes for geophysical applications // Pure and Applied Geophysics. 2000. 157. P. 357–382.

9. *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.

10. *Taylor R.W.*, *Fleming A.H.* Characterizing jointed systems by azimuthal resistivity surveys // Ground Water. 1998. 26. N.4. P. 464-474.

11. *Wishart D.N.*, *Slater L.D. and Gates A.E.* Self potential improves characterization of hydraulically-active fractures from azimuthal geoelectrical measurements // Geophysics Research Letters, 2006. 33, 17314, doi:1029/2006GL027092. P.1-5.