Записки Ленинградского ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени горного института им. Г.В.Плеханова,
т. XXX 1980 г.

УДК 551.49.3+556.3

ОПЫТ ГИДРОГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРИ ИЗУЧЕНИИ ПРОБЛЕМЫ ОХРАНЫ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

В.Г.РУМЫНИН, В.К.УЧАЕВ,
В.В. ШЕМЕЛИНИН

В настоящее время гидрогеофизические методы находят все более широкое применение в практике гидрогеологических изысканий [1,2,5,7]. Вместе с тем нередки ситуации, когда постановка геофизических работ не учитывает специфики конкретных гидрогеологических исследований и носит во многом формальный характер. С другой стороны, стандартные модификации геофизических методов часто не учитывают искажающего влияния ряда факторов, вызывающих существенные погрешности результатов. Поэтому в настоящей статье, наряду с иллюстрациями возможностей решения конкретных гидрогеологических задач гидрогеофизическими методами, особое внимание уделяется вопросам повышения информативности и надежности последних.

В основу статьи легли результаты исследований авторов по проблеме охраны подземных вод от загрязнения в горнодобывающих районах КМА. Сразу же отметим, что гидрогеологические исследования при решении вопросов охраны подземных вод требуют детальной профильной дифференциации водоносных горизонтов по фильтрационным свойствам, оценки характера гидравлической взаимосвязи поверхностных водоемов с подземными водами и изучения миграционных параметров водоносных пород. При этом гидрогеофизические методы могут иметь самостоятельное значение (например при определении послойных скоростей фильтрации на отдельных участках), а также повышать информативность других видов работ (например опытно-миграционных опробований пластов).

При постановке исследований на участках возможного загрязнения водоносных горизонтов водами технических водоемов необходимо непосредственно определять скорость фильтрации в различных точках пласта, так как расчет этой характеристики по картам гидроизогипс часто дает неудовлетворительные результаты из-за слабой изученности фильтрационных параметров. Рассмотрим с этих позиций возможности подобных оценок методом скважинной резистивиметрии.

Как известно, определение скоростей фильтрации по данным резистивиметрии сводится к засолению воды в скважине с последующим наблюдением за

рассолением под действием потока подземных вод. Скорость фильтрации [2]

$$v = \frac{\pi d_c}{4\xi t} \ln \frac{c_0 - c^0}{c - c^0}, \qquad (1)$$

где d_c – диаметр фильтра скважины; ξ – коэффициент искажения потока, учитывающий состояние прифильтровой зоны; t – время изменения текущей концентрации c; c_0 – концентрация индикатора в скважине сразу после засоления; c^0 – фоновая концентрация.

Основным достоинством метода резистивиметрии является простота и доступность. Вместе с тем его применение может не дать желаемых результатов, если не принять во внимание следующие обстоятельства:

1) каждая опробуемая скважина требует индивидуального определения коэффициента ξ;

2) формула (1) не учитывает влияния молекулярной диффузии раствора в пласт на процесс рассоления;

3) в опытной скважине должны отсутствовать вертикальные перетоки, в том числе и вызванные плотностной конвекцией индикатора внутри скважины.

Выбор величины параметра ξ имеет принципиальное значение при испытании скважин, несовершенных по характеру вскрытия. К рекомендуемым в литературе характерным значениям [5] следует относиться с осторожностью, поскольку этот показатель зависит от многих факторов и, кроме того, может меняться во времени. Поэтому значение ξ следует определять непосредственно перед проведением исследований для каждой конкретной скважины. **Коэффициент**

$$\xi = \frac{4}{1 + \frac{d_c^2}{(d_c + 2\delta)^2} + \frac{k}{k_c}\left[1 - \frac{d_c^2}{(d_c + 2\delta)^2}\right]} \qquad (2)$$

где δ – толщина прифильтровой зоны с измененной проницаемостью; k – коэффициент фильтрации пласта; k_c – коэффициент фильтрации закольматированной зоны [2].

При малой толщине закольматированной зоны [6]

$$\xi = \frac{2}{1 + \frac{2k\delta}{k_c d_c}} \qquad (3)$$

При толщине закольматированной зоны до 10 мм ошибка расчета по формуле (3) не будет превышать 20–25 %.

Используя выражение (3), можно рассчитать коэффициент искажения потока, предварительно определив отношение k_c / δ по данным экспресс-налива; исходное выражение для обработки гидродинамической части эксперимента имеет вид

$$\ln \frac{H_0}{H} = \frac{4 k_c l t}{\delta d_c}, \qquad (4)$$

где H_0 и H – превышение уровня воды в скважине над статическим на моменты времени $t = 0$ и t; l – длина фильтрующего интервала.

Основным недостатком такого метода определения величины k_c / δ является допущение о неизменности напора на внешней границе закольматированной зоны в процессе налива, что справедливо лишь при сравнительно высокой степени кольматации (при малых ξ). Поэтому при $\xi > 0,1 \div 0,3$ можно рекомендовать методику оценки этого показателя, описанную в работе [6]. Однако ее применение зависит от степени изученности емкостных характеристик пород на исследуемом участке. В целом же при постановке резистивиметрических наблюдений, особенно в водоносных горизонтах с плохо изученными фильтрационными свойствами, необходимо сводить к минимуму влияние кольматации опытных скважин.

Нижний предел чувствительности резистивиметрического метода часто связан с интенсивностью процессов молекулярно-диффузионного выноса индикаторного раствора из скважины в пласт. Исследованиями [5, 7] установлено, что пренебрежение этим фактором приводит к абсолютным погрешностям в определении скорости фильтрации от 0,05 до 0,2 м/сут.

Более заметно на результаты резистивиметрии влияет плотностная дифференциация индикатора в стволе наблюдательной скважины, вызванная гравитационными силами, а также перетоки внутри ствола скважины.

Оценивая возможности метода резистивиметрии, можно считать, что при благоприятных условиях и с учетом сделанных оговорок он помогает решить важную гидрогеологическую задачу по определению скоростей фильтрации в водоносных комплексах.

Однако принимая во внимание ряд осложняющих факторов (прежде всего, малые значения естественных скоростей фильтрации, часто находящиеся на пределе чувствительности метода, а также неудовлетворительное состояние фильтров многих наблюдательных скважин) целесообразно сочетать резистивиметрию с другими гидрогеофизическими методами, прежде всего с расходометрией и термометрией.

В частности, ценную информацию о распределении скоростей фильтрации можно получить при изучении сезонных колебаний температуры в водоносных горизонтах вблизи поверхностных водоемов, питающих подземные воды. Обусловлено это тем, что сезонные температурные колебания в потоке распространяются на значительные расстояния от береговой линии (первые сотни метров при скоростях фильтрации, равных десятым долям метра в сутки). Кроме того, благодаря преимущественно кондуктивному характеру теплопередачи от пласта к скважине, местоположение и состояние ее фильтра практически не влияет на результаты измерений, что выгодно отличает данный метод от резистивиметрии.

Считая сезонные изменения температуры воды в питающем пласт водоеме близкими к синусоидальным, а потери тепла в окружающие пласт породы пренебрежимо малыми, для описания температурного поля пласта можно обратиться к известному решению Столлмена [8], из которого нетрудно вывести следующую приближенную зависимость для скорости фильтрации [6]

$$v = v' \frac{C_{0.п}}{C_{0.в}} \qquad (5)$$

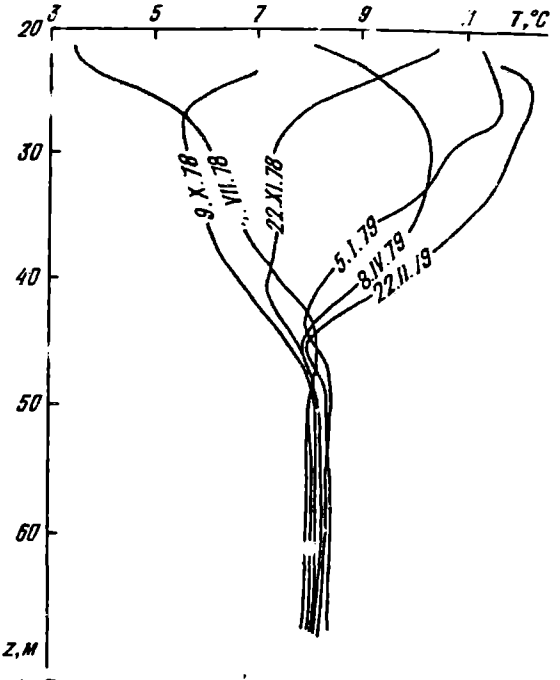


Рис.1. Результаты режимных гидрогеотермических наблюдений по скважине II
z - глубина скважины

где $v' = x/t_x$; x - расстояние от границы питания до скважины t_x - время, на которое сдвинуты фазы периодических температурных колебаний в водоеме и на расстоянии x от него, $C_{0.п}$ и $C_{0.в}$ - объемная теплоемкость водоносного пласта и воды соответственно.

Анализ точного решения задачи, полученного на математической модели, показал, что заметное уменьшение расчетных скоростей, связанное с тепловыми потерями в подстилающие и перекрывающие породы, происходит только при малых мощностях водоносного слоя.

В качестве практического примера приведем результаты гидрогеотермических наблюдений, выполненные в скважине II гидронаблюдательной сети хвостохранилища Лебединского ГОКа. Скважина расположена в 80 м от берега; она пересекает водоносные мелы и мергели и заканчивается 5-метровым фильтром, оборудованным на подстилающие пески.

Термокаротажные кривые, полученные по скважине (рис.I), свидетельствуют о наличии здесь участка интенсивной фильтрации воды из хвостохранилища: сезонная амплитуда колебаний температуры в отдельных интервалах скважины приближается к 9 °С[x]. По форме каротажных кривых удалось выделить три зоны с существенно различными скоростями фильтрации подземных вод.

В верхней, по всей видимости наиболее трещиноватой, зоне мелов отмечены максимальные амплитуды колебаний температуры и наиболее короткий их сдвиг по фазе по сравнению с колебаниями температуры в хвостохранилище: t_x = I80 сут, что соответствует скорости фильтрации, близкой к 0,4 м/сут. Ввиду малой мощности этой зоны (3-4 м), оценку скорости фильтрации в ней следует считать приближенной.

Более надежно удалось определить скорость фильтрации в расположенной глубже I5-метровой зоне трещиноватых мелов. Из термограмм видно, что

[x] Максимальная температура в хвостохранилище отмечается в период с 1 по 15 июля и составляет 20-22 °С.

здесь отставание по фазе составило около 240 сут, отсюда по формуле (5) $v = 0,2$ м/сут.

В третьей, самой нижней зоне, сложенной наименее проницаемыми мелами и мергелями, скорость фильтрации оказалась ниже: здесь были отмечены лишь минимальные температурные колебания с амплитудой менее 1 °С.

Нужно сказать, что на точности результатов гидрогеотермических наблюдений заметно сказываются вертикальные движения воды в скважине, обусловленные тепловой конвекцией. Имеются данные о заметном ее проявлении уже при геотермических градиентах, равных 0,02–0,03 °С/м [3].

Термоконвективные токи несколько сглаживают реально существующие в пласте тепловые аномалии и могут послужить причиной занижения скорости фильтрации при ее определении только на основании амплитуды сезонных колебаний температуры в водоносном горизонте. Вместе с тем такие процессы, вероятно, не должны заметно смещать фазы температурных колебаний в точке наблюдения, по сравнению с таковыми в пласте, т.е. формула (5) даже в этом случае должна работать удовлетворительно.

Отметим, что гидрогеотермический метод может также с успехом использоваться для определения скорости фильтрации в слабопроницаемых придонных отложениях, если оборудование инфильтрометров связано со значительными затратами времени и не дает точных результатов. В этом случае проводится термозондирование, т.е. определение температурного градиента в верхнем слое придонных отложений при помощи специального зонда с наконечником с термодатчиком.

Наиболее удобным временем для экспериментов являются июнь и июль, поскольку именно в этот период температурные градиенты в придонных отложениях достигают максимума. По данным термозондирования, скорость фильтрации в придонных отложениях нетрудно определить из решения Стоммена с использованием известных или табличных значений теплофизических параметров. В последнем случае ошибка в определении скорости фильтрации не превысит 0,01 м/сут; вместе с тем ее можно резко снизить, проводя эталонное термозондирование в условиях отсутствия инфильтрации.

Термозондирование целесообразно использовать на участках с низкой интенсивностью инфильтрации, когда применение инфильтрометров затрудняется их недостаточной чувствительностью. Об этом, в частности, свидетельствуют результаты термозондирования придонных отложений хвостохранилищ Лебединского и Михайловского ГОКов. Четко выраженные температурные градиенты (0,5–7 °С/м) были отмечены на тех участках, где инфильтрометрические замеры показали отсутствие фильтрационных потерь. Данными термозондирования было также подтверждено, что практически все очаги инфильтрации приурочены к прибрежной зоне водоемов.

Особое значение гидрогеофизические исследования приобретают при постановке и проведении опытно-миграционных работ (ОМР), так как надежность последних в значительной мере определяется полнотой изученности гидрогеологических условий опытного участка [4]. Практика ОМР показывает, что даже при сравнительно простом гидрогеологическом строении опробуемого водоносного горизонта на результаты эксперимента влияют несколько трудно

учитываем. ... факторов. Своевременному выявлению таких факторов способствует комплекс гидрогеофизических исследований и наблюдений, проводимых как предварительно, так и в ходе ОМР:

1) детализация гидрогеологического строения (разреза) и выделение зон преимущественного переноса индикатора на участке проведения ОМР;

2) контроль качества и состояния наблюдательных скважин;

3) определение направлений и скорости потока подземных вод на участке до опыта и в процессе инъекции индикаторного раствора в пласт;

4) прямая регистрация концентрации индикаторного раствора в отдельных наблюдательных точках.

Целям гидродинамического расчленения разреза может служить прежде всего расходометрический каротаж наблюдательных скважин, например в ходе налива; при малых расходах налива в тех же целях можно следить за перемещением в скважине контакта пресной и соленой воды с помощью резистивиметра.

Собственно миграционной части эксперимента должна также предшествовать тарировка наблюдательных скважин опытного куста для оценки состояния их профильтровой зоны. Контролирующими параметрами здесь являются показатель искажения потока ξ и коэффициент гидрохимической инерционности α [3]. Они могут быть также определены резистивиметрическим методом во время нагнетания (налива) в центральную скважину пластовой воды, когда в точках расположения пьезометров устанавливается фиксированная скорость фильтрации $v = Q_н / 2\pi m r$ (здесь $Q_н$ – расход нагнетания, m – мощность фильтрующего интервала, r – расстояние между скважинами).

Такой подход делает резистивиметрию и опытные экспресс-наливы взаимно дополняющими и контролирующими методами. Резистивиметрия наблюдательной скважины проводится по всей длине фильтра, что позволяет дополнительно оценить активную мощность опробуемого интервала и наметить оптимальные точки отбора гидрохимических проб в процессе индикаторного опыта.

При длительных наливах в центральную скважину, когда температура инъецируемой воды заметно (более, чем на 1-2 °С) отличается от температуры пласта, возникает также возможность дифференцировать опробуемый разрез по степени проницаемости с помощью периодических наблюдений за изменением температуры воды в ближайших наблюдательных скважинах (рис.2). Наиболее быстрый рост температуры (и большие скорости фильтрации) отмечены в верхней части водоносного горизонта.

Говоря о возможности термометрии при миграционном опробовании пластов, упоминаем и о выявлении с ее помощью интервалов затрубной циркуляции воды.

При опытных наливах в трещиноватых планово-анизотропных породах сравнительную оценку скоростей фильтрации в различных направлениях от центральной скважины в горизонтах пресных вод можно провести методом заряженного тела [2].

Определенную помощь при решении аналогичных задач может оказать также метод круговых вертикальных зондирований; он позволяет выявить плановую анизотропию трещиноватых пород на различных глубинах. Постановка

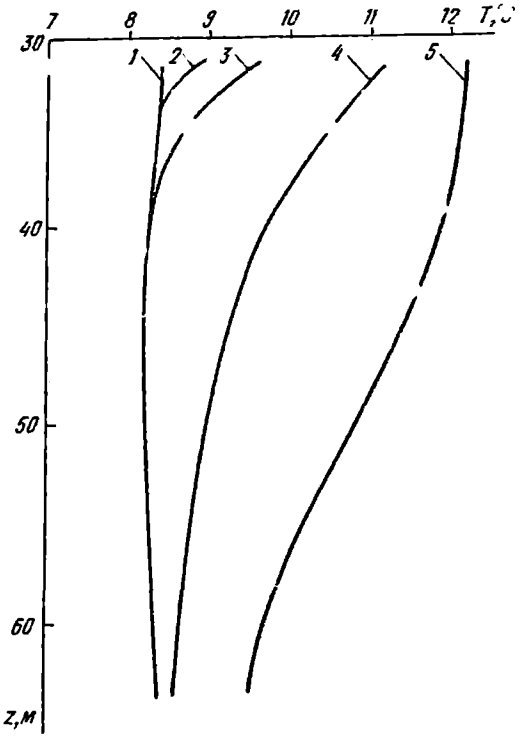


Рис.2. Термограммы по наблюдательной скважине в ходе миграционного налива в центральную скважину
1 – до начала опыта; 2, 3, 4 и 5 через 1, 2, 3 и 6 сут после начала опыта соответственно

зондирования на опытном участке особенно полезна еще на стадии планирования миграционного эксперимента в трещиноватых породах для выбора оптимального расположения наблюдательных скважин.

Весьма эффективно применение геофизических методов (особенно резистивиметрии) для непосредственной регистрации прихода индикатора в наблюдательную скважину. Сохраняя при благоприятных условиях (малая фоновая минерализация) точность, присущую полевым гидрохимическим анализам, резистивиметрический метод индикации имеет в то же время определенные преимущества, благодаря своей оперативности и возможности дистанционного определения концентрации трассера практически на любой глубине. Главное этот метод дает возможность контролировать текущие значения концентрации индикатора в изолированных интервалах, исключая влияние межслоевых его перетоков по стволу скважины. Для получения выходной кривой с помощью резистивиметрии требуется только, чтобы инъецируемый в пласт раствор электролита не менее, чем в полтора–два раза превосходил по минерализации фоновую минерализацию подземных вод. Это условие вполне выполнимо при опробовании водоносных горизонтов, содержащих пресные воды.

Приведенный материал показывает, сколь богатые возможности заключает в себе использование гидрогеофизических методов при решении проблемы охраны подземных вод.

Несомненная высокая эффективность апробированных и описанных здесь модификаций методов скважинной резистивиметрии и термометрии позволяет рекомендовать их к самому широкому практическому внедрению уже в настоящее время.

ЛИТЕРАТУРА

Гершанович И.М. Теоретические основы и методы расходометрического каротажа гидрогеологических скважин. – Автореф. докт. дисс. М., изд.ВСЕГИНГЕО, 1978. 43 с.

2. Матвеев Б.К. Геофизические методы изучения динамики подземных вод. М., Госгеолтехиздат, 1963. 132 с.

3. Мироненко В.А., Румынин В.Г. Гидрохимическое опробование при изучении массопереноса в подземных водах. – Разведка и охрана недр, 1979, № 5, с.38–43.

4. Мироненко В.А., Учаев В.К. Постановка опытно-миграционных работ. – Разведка и охрана недр, 1979, № 11, с.40–47.

5. Огильви Н.А., Федорович Д.И. Электролитический метод определения скорости фильтрации подземных вод и условия его практической применимости. М., Недра, 1964. 44 с.

6. Учаев В.К. Гидрогеологические исследования на участках возможного загрязнения подземных вод в горнодобывающих районах. Автореф. канд. дис. Л., изд. ЛГИ, 1980. 26 с.

7. Чураев Н.В., Ильин Н.И. Радиоиндикаторные методы исследования движения подземных вод. М., Атомиздат, 1973. 176 с.

8. S t a l l m a n R.W. – Jour.Geophys.Res., 1960, 65(9), p.2883–2885.

9. W i l l i a m s R.E., K e s b l y C.D., M i n k L.L. – Society of Mining Engineers, AJME, 1973, v.254, p.212–216.