

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бухгольц Г. Расчет электрических и магнитных полей. - М.: ИЛ, 1961. - 712 с.
2. Гринберг Г.А. Избранные вопросы математической теории электрических и магнитных явлений. - М.-Л.: АН СССР, 1948. - 730 с.
3. Краев А.П. Основы геоэлектрики. - Л.: Недра, 1965. - 588 с.
4. Методы расчета электростатических полей /Миролюбов Н.Н., Костенко М.В., Левинштейн М.Л. и др. - М.: Высшая школа, 1963. - 426 с.
5. Овчинников И.К. Теория поля. - М.: Недра, 1979. - 352 с.
6. Сапожников В.М. Возмущение электрического поля точечного источника проводящим плоским круглым диском //Вопросы разведочной геофизики: Тр.Свердл.горного ин-та. - Свердловск, 1973, вып. 105. - С.88-106.
7. Сапожников В.М. Скважинная электроразведка рудоносных структур: Дис. ... докт.геол.-минер.наук. - Свердловск, 1988. - 460 с.
8. Халфин Л.А. Поле точечного источника в присутствии сжатого или вытянутого сфероидов //Изв. АН СССР, сер.геофиз. - 1956. - №. - С.657-668.
9. Электроразведка рудных полей методом заряда /Семенов М.В., Сапожников В.М., Авдевич М.М. и др. - Л.: Недра, 1984. - 216 с.

УДК 550.83

И.Г.Сковородников

## УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНИКИ И МЕТОДИКИ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ СКВАЖИН

Потребление пресных вод для обеспечения промышленности, сельского хозяйства и бытовых нужд населения увеличивается во всем мире. Доля подземных вод в общем водопотреблении России составляет около 8%, в то время как в развитых европейских странах она достигает 60-80% [1]. Нет сомнений, что и в нашей стране роль подземных вод будет возрастать, так как ресурсы поверхностных вод ограничены, а загрязненность их увеличивается.

Уже сегодня для целей водоснабжения, гидрогеологических и инженерно-геологических исследований в России ежегодно сооружается свыше 18 тыс.скважин, причем бурение в большинстве случаев ведется сплошным забоем, без отбора керна [1,4]. По этой причине вопросы усовершенствования техники и методики их исследований весьма актуальны и имеют большое научное и практическое значение. Один из основных путей увеличения информативной ценности буровых скважин на воду заключается в привлечении для их исследований современных геофизических методов.

Геофизические исследования скважин (ГИС) при гидрогеологических изысканиях обеспечивают решение таких задач, как литологическое расчленение разрезов скважин и выделение в них водоносных горизонтов, определение емкостных и фильтрационных свойств коллекторов воды, определение минерализации и изучение элементов динамики подземных вод. При этом методы ГИС позволяют повысить точность и достоверность определений, увеличить их оперативность и уменьшить стоимость, в первую очередь, за счет сокращения объемов опытных и пробных откачек и поинтервального опробования [2,4]. Однако возможности ГИС в этой области не реализуются в полной мере из-за неустранимых недостатков методического и аппаратного обеспечения.

В настоящей статье обобщаются результаты работ, проводившихся в Уральском горном институте (ныне УГГГА) по применению ГИС для гидрогеологических целей в течение последних 20 лет. Разработки, выполненные за это время, получили известное признание на производстве, опубликованы в специальной литературе, демонстрировались на зарубежных выставках и на ВДНХ СССР, их новизна на мировом уровне подтверждена более чем 40 авторскими свидетельствами.

В решение каждой из перечисленных выше задач по исследованию скважин на воду этими разработками внесен определенный вклад методического или аппаратного характера.

**Задача литологического расчленения разрезов** успешно решается с помощью геофизических методов в скважинах, пробуренных на воду как в осадочных, так и в изверженных и метаморфических породах. Возможности ГИС и удельный вес отдельных методов каротажа в различных геолого-технических условиях проанализированы в отечественных и зарубежных источниках [2]. Определенная сложность решения этой задачи заключается в том, что большая часть



скважин имеет небольшую (до 300-400 м) глубину [4], и применение для их исследования типовых каротажных станций и комплексных скважинных приборов становится нерентабельным.

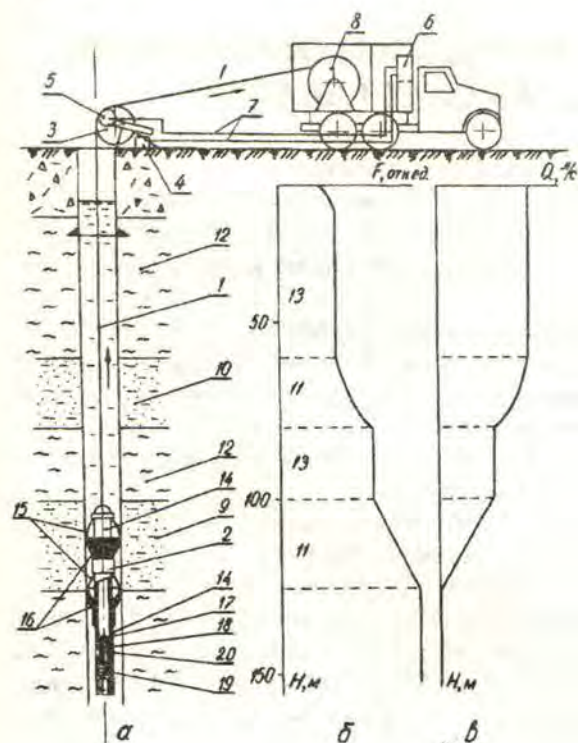
В зарубежных странах для исследования гидрогеологических скважин существуют малогабаритные, в т.ч. переносные каротажные станции. В нашей стране такие станции серийно не выпускаются.

В 70-х годах был разработан переносный пульт электрического каротажа ПЭК-СГИ, предназначенный для использования совместно с переносным радиометром ПРКС-2 и входящим в его комплект самописцем Н-361 и лебедкой с трехжильным кабелем [8].

Пульт имеет автономное питание ( $\approx 12$  В) и позволяет записывать диаграммы КС, ПС, МСК и МЭП, которые совместно с диаграммами ГК обеспечивают практически однозначное расчленение разрезов. Пульт был испытан на низкоомных и высокоомных геологических разрезах и внедрен в производство в целом ряде организаций. На ВДНХ СССР пульт был отмечен бронзовой медалью.

**Выделение водоносных горизонтов**, определение их мощности и строения тесно связано с литологическим расчленением разрезов скважин. Особенности физических свойств поровых коллекторов воды позволяют достаточно уверенно определять их границы по диаграммам различных методов ГИС [2,4]. Сложнее решается этот вопрос в случае трещинных коллекторов, которыми могут служить породы различного состава (осадочные, изверженные, метаморфические). В этих случаях приходится применять методы, основанные на регистрации физических полей, непосредственно связанных с притоком подземных вод в скважину - резистивиметрии, термометрии или расходомерии [2,4]. Однако эти методы требуют дополнительных затрат времени и средств на возбуждение притока вод и его регистрацию.

Предложен ускоренный способ выделения водоносных горизонтов, пригодный как для трещинных, так и для поровых коллекторов [8]. Способ осуществляется сразу после завершения проходки скважины (рис. 1).



**Рис.1. Ускоренный способ выделения водоносных горизонтов в разрезах буровых скважин:**

**а** - схема осуществления способа; **б** - график изменения силы натяжения кабеля по скважине; **в** - контрольная расходограмма.

1 - кабель-трос; 2 - сваб; 3 - блок-баланс; 4 - датчик натяжения кабеля; 5 - сельсин-датчик; 6 - регистратор каротажной станции; 7 - соединительные кабели; 8 - лебедка; 9,10 - водоносные горизонты; 11 - участки, соответствующие водоносным горизонтам на диаграмме натяжения кабеля; 13 - участки водоупоров на диаграмме натяжения кабеля; 14 - корпус сваба; 15 - центрирующие рессоры; 16 - резиновые уплотнители; 17 - шариковый клапан; 18 - подвижный шток с отверстиями; 19 - цилиндрическая пружина; 20 - окна в корпусе сваба

При бурении скважин с промывкой глинистыми растворами поры и трещины водоносных горизонтов в зоне, прилегающей к стенкам скважины, заполняются глинистым материалом. Чтобы открыть доступ подземным водам в скважину, прибегают к протаскиванию по скважине уплотненного поршня-сваба, под которым создается зона пониженного давления. Предложенный способ заключается в регистрации силы натяжения кабеля-троса, на котором подвешен сваб. Способ реализуется с помощью серийного оборудования: сваба с регулируемым клапаном, датчика силы натяжения кабеля и каротажного самописца.

При подъеме сваба с забоя скважины сила натяжения кабеля остается постоянной (величина ее определяется регулировкой клапана сваба) до тех пор, пока сваб не доходит до водоносного горизонта. При прохождении водоносного горизонта понижение давления под свабом вызывает приток подземных вод в скважину и сила натяжения кабеля-троса уменьшается, что и фиксируется на диаграмме (рис. 1,б).



Способ проверен в скважинах Новосибирской области. Результаты его хорошо согласуются с данными последующей расходомерии (рис.1,в).

**Емкостные свойства** водоносных горизонтов характеризуются коэффициентом пористости  $K_n$  или коэффициентом объемной трещинной пустотности  $K_{тр}$  (для трещинных разновидностей коллекторов).

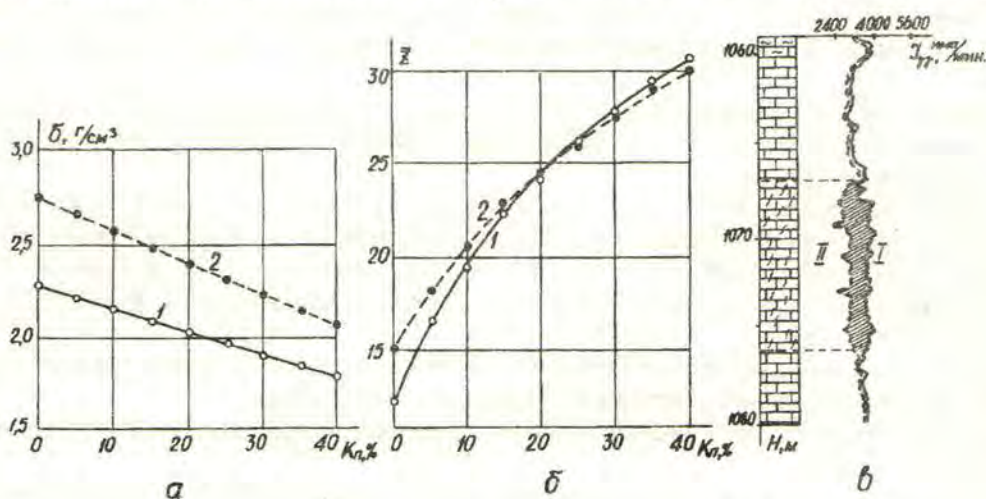
**Определение коэффициента пористости** выполняется теми же способами, которые были разработаны для нефтеносных коллекторов: по данным электрического каротажа, АК, НГК, ПГК, ЯМК и др. методов ГИС [2,4]. Кроме перечисленных способов, основанных на зависимости каротажных характеристик пластов от  $K_n$ , известны способы «картаж-воздействие-картаж», связанные с воздействием на коллектор какой-либо жидкостью, отличающейся по физическим свойствам от пластового флюида, и в выявлении результатов этого воздействия, зависящих от пористости. Так, например, в справочнике [10] описан способ определения  $K_n$ , включающий ПГК, закачку в пласт раствора повышенной плотности и повторный ПГК. Простой расчет показывает, что плотность коллекторов мало меняется в зависимости от  $K_n$ . Так, изменение пористости на 10% вызывает изменение плотности всего лишь на 5-6% от плотности минерального скелета породы (рис.2,а).

Предложено воздействовать на пласты-коллекторы раствором с повышенным эффективным атомным номером  $\bar{Z}$ , а до и после воздействия записывать диаграммы СГК [5].

При заполнении пор коллектора 30% раствором ацетата или нитрата свинца ( $\bar{Z}=45,6$ )  $\bar{Z}$  всего коллектора гораздо сильнее зависит от пористости, чем плотность. Так, например, изменение  $K_n$  на 10% вызывает изменение  $\bar{Z}$  на 4-5 ед., т.е. на 20-30% от  $\bar{Z}$  минерального скелета породы (рис.2,б). Учитывая, что  $\bar{Z}$  пород по данным СГК может быть измерено с абсолютной погрешностью, не превышающей 0,3-0,4 ед., с помощью предложенного способа можно выделять коллектора (рис.2,в) и определять их  $K_n$ , начиная с пористости в 2-3%.

Разработаны теоретические и методические аспекты способа.

**Определение трещиноватости  $K_{тр}$**  в практике инженерной геологии и гидрогеологии



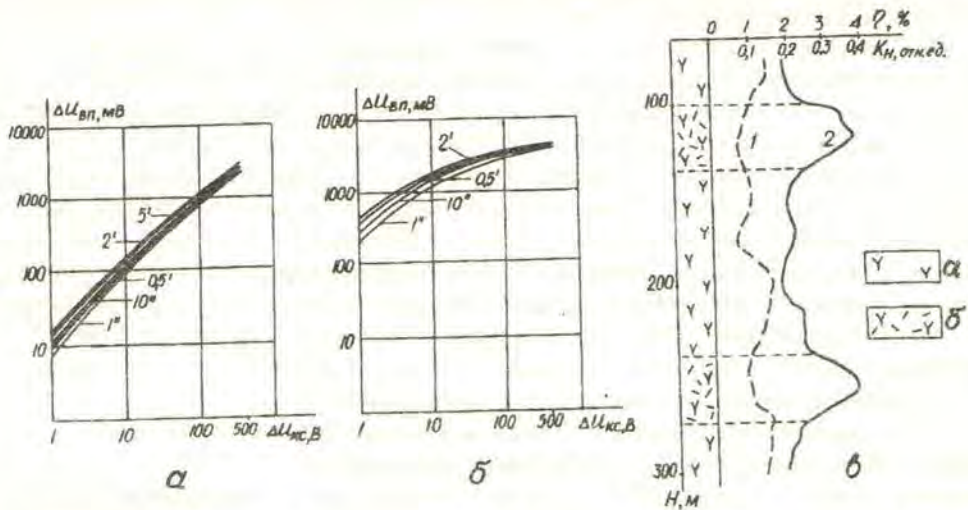
**Рис.2.** Зависимость плотности (а) и эффективного атомного номера (б) коллекторов от коэффициента пористости для песчаников (1) и известняков (2), и пример выявления трещинного коллектора (в) в толще карбонатных пород по данным первичного (I) и повторного (II) селективного ГГК

выполняется с помощью прямых или косвенных способов.

Прямые способы, основанные на экспериментальном определении объемов или площадей трещин на шлифах, образцах керна или обнажениях, весьма трудоемки; косвенные, основанные на измерении уровня шумов при бурении, данных КС или АК, - недостаточно достоверны [2,4].

Предложен способ определения  $K_{тр}$  по измерениям вызванной поляризации (ВП) горных пород. Способ базируется на выявленной опытным путем, по измерениям на образцах и обнажениях, зависимости между коэффициентом трещиноватости и коэффициентом нелинейности ВП  $K_n = \eta_1 - \eta_2 / \eta_1$ , где  $\eta_1$  и  $\eta_2$  - коэффициенты поляризуемости, измеренные при малом  $\Delta U_{кс1}$  и большом  $\Delta U_{кс2}$  значении поляризующего напряжения. В монолитных породах поляризуемость практически не меняется при увеличении  $\Delta U_{кс}$ , в трещиноватых - уменьшается тем сильнее, чем больше  $K_{тр}$ , что объясняется, по всей вероятности, распространением тока прежде всего по трещинам породы и нелинейным возрастанием ВП при увеличении плотности тока [8]. На рис.3 показаны результаты измерений ВП при различных экспозициях и поляризующих напряжениях, полученные на образцах монолитных (а), трещиноватых (б) фельзитов, и пример проявления трещиноватости пород на измерениях  $K_n$  по образцам керна одной из





**РИС. 3.** Зависимость разности потенциалов ВП от поляризующего напряжения для монолитных (а) и трещиноватых (б) фельзитов; обнаружение трещиноватых зон (в) по измерениям поляризуемости (1) и коэффициента нелинейности ВП (2) на образцах керна одной из разведочных скважин.

Шифр кривых на рис. 3, а и 3, б - время зарядки

скважин (в). Экспериментально подобраны оптимальные значения времени зарядки,  $\Delta U_{кст1}$ ,  $\Delta U_{кст2}$  и изучена зависимость  $K_n = f(K_{тр})$  для пород разного состава: песчаников, алевролитов, известняков, фельзитов. Способ рекомендован для количественной оценки трещиноватости при измерениях на образцах, обнажениях и в скважинах. Он внедрен в производство на одном из горно-химических комбинатов Казахстана.

**Определение коэффициента фильтрации  $K_f$**  водоносных горизонтов производится с помощью методов, основанных на непосредственном измерении притока вод в скважину, в первую очередь, расходомерии [2,3,4].

Наибольшим распространением пользуется методика установившегося возбуждения, согласно которой скважину возбуждают откачкой (или доливом) до установления квазистационарного режима, а затем измеряют разность статического и установившегося динамического уровней в скважине и расход (или дебит) каждого водоносного горизонта. Формула для вычисления  $K_f$  получена из закона Дюпюи для напорных вод.

Необходимыми приборами для реализации этой методики являются скважинные расходомеры и уровнемеры, устойчивый дефицит которых существует по всей стране.

С целью уменьшения этого дефицита в УГГА разработан ряд скважинных расходомеров и уровнемеров.

**Тахометрические расходомеры** оснащены преобразователями индуктивного (РСИ-3) или магнитоуправляемого типа на герконах (PCM-1 и PCM-40) или магнитодиодах [7].

Расходомер с радиационным преобразователем выполнен в виде приставки к скважинному снаряду серийного каротажного радиометра [9]. Все расходомеры отличаются высокой чувствительностью, простой измерительной схемой и надежностью в эксплуатации. Конструкция их обеспечивает некоторые преимущества (например, защиту опор крыльчатки от скважинного флюида) перед другими расходомерами.

Методика измерений с расходомерами УГГА не отличается от общепринятой. Использование их в ряде производственных научно-исследовательских организаций подтвердило их хорошие эксплуатационные качества. Расходомер РСМ-1 удостоен серебряной медали ВДНХ СССР.

**Уровнемеры** относятся к типу погружных манометров. При измерениях их устанавливают заведомо ниже динамического уровня в скважине и о приращении уровня судят по изменениям гидростатического давления, воздействующего на чувствительный элемент уровнемера. Такие приборы удобны для измерений как в наблюдательных, так и в испытательских скважинах, для которых не применимы обычные поплавковые или электроконтактные уровнемеры.

Чувствительным элементом в уровнемерах УГГА служат либо герметичная камера, заполненная частично газом, частично электропроводной жидкостью и отделенная от внешней среды гибкой мембраной, либо подпружиненный поршень, которому придаются вибрации небольшой амплитуды для преодоления трения покоя [8].

Положение как уровня электропроводной жидкости, так и подпружиненного поршня преобразуется с помощью реостатного датчика в электрический сигнал, который регистрируется на диаграммной ленте каротажного самописца, перемещаемой с постоянной скоростью. Приборы имеют автономное питание.



Погрешность измерений мембранного уровнемера - 5 см; относительная погрешность пружинно-поршневого - 5% от диапазона измерений, который может быть изменен за счет смены измерительной пружины. Теоретические основы разработанных приборов, их конструкция, методика градуировки и измерений описаны в статьях [7,8] и методических руководствах. Уровнемеры прошли производственные испытания и внедрены в нескольких производственных организациях.

Благодаря этим уровнемерам стала осуществимой методика определения  $K_{\phi}$  при неуставившемся режиме возбуждения скважин, в основе которой лежат известные уравнения Тейса, описывающие зависимость изменения давления (или динамического уровня) водоносного горизонта от времени при постоянном дебите (при откачке) или расходе (при доливе) скважины.

Для измерения расхода (или дебита) при реализации данной методики нами разработан оригинальный расходомер, не содержащий вращающихся деталей [8]. Чувствительным элементом этого прибора служат две гибкие пластинки, установленные вдоль измеряемого потока. Поскольку давление в движущейся среде понижается, пластинки прогибаются навстречу друг другу. Прогиб пластин преобразуется в электрический сигнал с помощью размещенных на них тензорезисторов. Этот расходомер с успехом может быть применен и для измерений внутри буровых скважин, в 1987 г. он был отмечен бронзовой медалью ВДНХ СССР.

Оценка минерализации подземных вод должна выполняться оперативно для решения вопроса о целесообразности дальнейшего оборудования скважины. Известно несколько способов решения этой задачи.

Наиболее надежный из них - взятие пробы пластового флюида пробоотборником на кабеле [4]. Однако в пробу попадает и фильтрат бурового раствора, долю которого в ней можно оценить только приблизительно.

Распространенный в нефтяной геофизике способ определения минерализации вод по данным метода ПС требует знания диффузионно-адсорбционной активности пород.

Известен также способ оценки минерализации подземных вод по данным метода КС, основанный на зависимости сопротивления горной породы  $\rho_{an}$  от сопротивления насыщающей ее влаги  $\rho_a$ :

$\rho_{an} = P_n \cdot \rho_a$  [2]. Коэффициент пропорциональности  $P_n$ , называемый параметром пористости, зависит от структурно-текстурных особенностей породы и от сопротивления пластового флюида. От тех же параметров зависит и сопротивление  $\rho_{an}$  породы в целом. По этой причине некоторые исследователи полагают возможным воспользоваться корреляционной зависимостью  $P_n = f(\rho_{an})$  и по ней определять значение  $P_n$ . Такой подход был использован автором для оценки минерализации подземных вод водоносных песков Новосибирской области. Была изучена по 16 скважинам корреляционная зависимость между минерализацией, найденной этим способом (x), и по данным хим.анализов вод (y). Получено уравнение связи  $y=0,63x+0,38$  и вычислен коэффициент корреляции  $r=0,785$ . На основе этой зависимости построена номограмма для оперативной оценки минерализации подземных вод по данным КС [8]. Эта номограмма использовалась геофизической службой треста «Востокбурвод».

Изучение элементов динамики подземных вод включает решение таких вопросов, как определение направления и скорости движения подземных вод, определение напора вскрытых скважиной водоносных горизонтов, установление существования гидравлической связи между водоносными горизонтами в разных скважинах.

Определение направления и скорости движения подземных вод в традиционной гидрогеологической практике выполняется с помощью метода индикаторов, который требует наличия нескольких скважин и довольно продолжительных наблюдений. Геофизики для решения этой задачи используют метод заряда [3] или гелиевый метод. Для постановки этих методов достаточно одной скважины, но первый из них имеет ограниченную глубинность (до 100 м), а второй требует специального оборудования, не обычного для каротажной службы. Известны также несколько способов (Мейерхофера, Абдуллаева, Латышева-Гончарова и др. [6]) для определения скорости и направления потока по измерениям в одиночной скважине, но им свойственна низкая точность измерений, причина которой заключается в ориентировании скважинных снарядов с поверхности земли.

Автором статьи предложено несколько приборов аналогичного назначения, свободных от этого недостатка. Повышенная точность определения направления потока достигается в них за счет того, что датчик ориентировки устройства относительно стран света располагается в самом скважинном снаряде.

Среди этих приборов устройство с датчиком направления потока в виде флюгера, выполняемое в форме приставки к серийному каротажному радиометру [9], устройство на базе скважинного фотоаппарата, устройство с измерительной камерой, заполняемой электролитом и снабженной центральным и радиальными электродами, простое устройство с источником красящего вещества, след которого фиксируется на слое сорбента, и др. Все эти устройства подробно описаны в обзоре [6].

Определение напора вскрытых скважиной водоносных горизонтов сводится к определению статического уровня водоносных горизонтов. Решение этой задачи осложняется тем, что при установлении статического уровня в скважине для каждого из вскрытых горизонтов в то же время существует свой



динамический уровень, так как между горизонтами происходит взаимодействие через скважину. Известна методика определения статических уровней всех вскрытых горизонтов [2], основанная на измерении расхода каждого из них при нескольких различных уровнях возбуждения. Эта методика успешно осуществляется с помощью расходомеров и уровнемеров, разработанных в УГГА, примеры такого рода исследований описаны нами в литературе [7].

**Установление наличия гидравлической связи** между водоносными горизонтами в разных скважинах в традиционных гидрогеологических исследованиях производится с помощью индикаторов, а при геофизических исследованиях - методом «гидропрослушивания» [2,3]. Суть последнего заключается в проведении откачки в испытательной скважине и выявлении реакции на эту откачку в наблюдательных скважинах посредством измерения возникающих в них осевых перетоков. Причиной этих перетоков служит понижение динамического уровня в водоносном горизонте, имеющем связь с горизонтом в испытательной скважине. Однако, поскольку наблюдательные скважины находятся на периферии депрессионной воронки, понижение динамического уровня в них значительно меньше, чем в испытательной скважине. Следовательно, и стимуляция осевых перетоков получается достаточно слабой. Нами предложен новый способ «увязки» водоносных горизонтов, основанный на измерении не осевой, а радиальной составляющей потока в наблюдательной скважине при возбуждении испытательной [8]. Этот способ обладает более высокой чувствительностью и большей дальностью действия, чем обычный способ гидропрослушивания. С целью аппаратного обеспечения способа нами разработан прибор для одновременного измерения осевой и радиальной составляющих потока жидкости в скважине. Этот прибор выполняется в виде приставки к скважинному снаряду серийного каротажного радиометра [9].

Кроме описанных выше приборов и способов, в УГГА предложено несколько способов и устройств радиоактивного и магнитного каротажа (а.с. N802892, 1805431) для литологического расчленения разрезов скважин, новый способ получения ориентированного керна при колонковом бурении скважин на воду (а.с. N1371077), несколько датчиков для непрерывных измерений азимутального и зенитного углов искривления скважин (а.с. N1509518, 1749872, 1819993) и некоторые другие приборы (а.с. N1442645). Все они позволяют расширить возможности геофизических методов при исследовании гидрогеологических скважин, повысить их геологическую и экономическую эффективность, придать большую достоверность получаемым результатам.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Башкатов А.Д. Современное состояние и тенденции развития технических средств сооружения гидрогеологических скважин // Техн. и технол. геол.-разв. работ; орг. пр-ва: Обзор / ВНИИ экон. минер. сырья и геол.-разв. работ. - М.: ВИЭМС, 1988. - 50 с.
2. Гершанович И.М. Разведка месторождений подземных вод в трещиноватых породах геофизическими методами. - М.: Недра, 1975. - 128 с.
3. Матвеев Б.К. Геофизические методы изучения движения подземных вод. - М.: Госгеолтехиздат, 1963. - 133 с.
4. Сидоров В.А., Калташов С.А., Коротченко А.Г. Состояние и развитие геофизических исследований гидрогеологических скважин // Развед. геофизика: Обзор / ВНИИ экон. минер. сырья и геол.-разв. работ. - М.: ВИЭМС, 1985. - 34 с.
5. Сковородников И.Г., Бреднев И.И. Применение селективного гамма-каротажа для выявления коллекторов в разрезах буровых скважин // Атомная энергия, т.22, вып.3, 1992. - С.293-295.
6. Сковородников И.Г., Макаров Л.В., Калашников В.Н. Изучение скорости и направления движения подземных вод // Гидрогеол. и инж. геология: Обзор / ВНИИ экон. минер. сырья и геол.-разв. работ. - М.: ВИЭМС, 1987. - 33 с.
7. Сковородников И.Г., Макаров Л.В., Калашников В.Н. Скважинные тахометрические расходомеры. - Деп. в ВИНТИ, N7609-B89, 1989. - 65 с.
8. Сковородников И.Г. Новые способы и устройства для исследования скважин на воду. - Деп. в ВИНТИ, N3172-B93, 1993. - 36 с.
9. Сковородников И.Г. Устройство на базе каротажных радиометров для гидрогеологических исследований в скважинах. - Деп. в ВИНТИ, N3015-B91, 1991. - 22 с.
10. Филиппов Е.М. Ядерная разведка полезных ископаемых: Справочник. - Киев: Наукова думка, 1978. - 588 с.