

3. Куликов В.А., Яковлев А.Г. Возможности магнитотеллурических методов при проведении работ на высокоомных разрезах // Разведка и охрана недр. — 2008. — № 12. — С. 3–6.
4. Куликов В.А., Яковлев А.Г. Применение новой аппаратуры производства ООО «Северо-Запад» при гидрогеологических и инженерных электроразведочных работах // Разведка и охрана недр. — 2008. — № 1. — С. 8–10.
5. Куликов В.А., Зорин Н.И., Манжеева И.Т., Яковлев А.Г. Разделение аномалий вызванной поляризации по частотным характеристикам дифференциального фазового параметра // Геофизика. — 2013. — № 6. — С. 23–31.
6. Куликов А.В., Шемякин Е.А. Электроразведка фазовым методом вызванной поляризации. — М.: Недра, 1978. — 157с.
7. Стогний В.В., Коротков Ю.В. Поиск кимберлитовых тел методом переходных процессов. — Новосибирск: Изд-во «Малотиражная типография 2D», 2010. — 121с.
8. Цыганов В.А. Надежность геолого-поисковых систем. — М.: Недра, 1994. — 299 с.

© Куликов В.А., Соловьева А.В., 2016

Куликов Виктор Александрович // vic@nw-geophysics.ru
Соловьева Анастасия Вадимовна // nastya_soloway@rambler.ru

УДК 550.837

Великин А.Б., Великин А.А., Алексеев Е.П., Королев А.А., Черныш В.Ю. (ФГУНПП «Геологоразведка»)

РЕЗУЛЬТАТЫ ПОЛЕВОГО ОПРОБОВАНИЯ КОРРЕЛЯЦИОННОГО МЕТОДА ИМПУЛЬСНОЙ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ СТЕМ

*Представлены результаты полевого опробования нового корреляционного метода импульсной электроразведки СТЕМ и экспериментального образца программно-аппаратного комплекса СТЕМ-1 с повышенной глубиной и разрешающей способностью для поисков углеводородного сырья на типичном платформенном разрезе в Калужской области, а также в двух районах Восточной Сибири в 2012–2014 гг. Все электромагнитные зондирования с комплексом СТЕМ-1 сопровождалось и сравнивались с зондированиями становлением поля в ближней зоне ЗСБ с электроразведочной системой Цикл-7, которые были проведены в тех же условиях. **Ключевые слова:** электромагнитное зондирование, псевдо-случайные шумоподобные сигналы (ШПС), СТЕМ.*

Velikin A.B., Velikin A.A., Alekseev E.P., Korolev A.A., Chernysh V.Y. (Geologorazvedka)

THE RESULTS OF FIELD TESTING OF THE CORRELATION METHOD OF PULSE ELECTROMAGNETIC PROSPECTING SYSTEMS STEM

*Field testing results of the new correlation transient electromagnetic method STEM as well as an experimental model of the system STEM-1 in Kaluga region, with typical platform section also, as well in two regions of Eastern Siberia in 2012–2014 are presented. The method STEM and the system STEM-1 had been designed for more depth penetration and resolution of oil and gas prospecting. All the electromagnetic STEM soundings were followed and compared with the TEM sounding in the same areas and in equal terms. **Key words:** transient electromagnetic sounding, noise-like signals, PRBS (pseudo random binary sequence), STEM.*

Метод СТЕМ и экспериментальный образец программно-аппаратного комплекса СТЕМ-1 были разработаны за счет средств федерального бюджета в рамках объ-

екта НИР Роснедр по созданию нового метода импульсной электроразведки с увеличенной глубиной и разрешающей способностью для поисков углеводородного сырья в 2009–2011 гг. [1]. Полевое опробование метода с использованием комплекса СТЕМ-1 проводилось на типичном платформенном разрезе в Калужской области в 2012 г. и на двух объектах региональных геологоразведочных работ в Восточной Сибири (район Троицко-Михайловского вала в Красноярском крае и Тубинская площадь в Иркутской области) в 2013–2014 гг.

Основной целью работ была оценка глубины и разрешающей способности нового метода СТЕМ по сравнению с традиционным методом ЗСБ. Поэтому опытно-методические полевые работы с комплексом СТЕМ-1 сопровождалось измерениями традиционным методом ЗСБ с электроразведочной системой Цикл-7. При практическом отсутствии точной информации о строении разреза одним из критериев оценки глубины исследований была способность регистрации наиболее поздних стадий переходного процесса. Другим критерием была глубина до кровли фундамента или иного опорного горизонта горных пород, определяемая по сейсмическим данным.

Целью предварительных испытаний комплекса СТЕМ-1 в Калужской области была проверка его работоспособности до испытаний в Восточной Сибири. Был пройден субмеридиональный профиль длиной около 10 км с соосными генераторной и приемной квадратными петлями со сторонами соответственно 800 и 400 м. Зондирования были выполнены на 7 пикетах при высоком уровне помех с частотой 50 Гц. Работы проводились с участием супервайзеров ФАН Роснедра по электроразведке (ОАО «Северо-Запад»). Полученные результаты доказали работоспособность комплекса СТЕМ-1. В тоже время была выявлена необходимость усовершенствования программного обеспечения для повышения устойчивости к помехам с частотой 50 Гц.

Рассмотрим основные результаты полевых работ на участке Присяяно-Енисейской синеклизы на профиле 3 Тубинской площади в Усть-Илимском районе Иркутской области в 2014 г. (рис. 1) и фрагменты результатов работ в районе Троицко-Михайловского вала на профиле 51 в Красноярском крае в 2013 г.

Геолого-геофизическое строение района работ на Тубинской площади

Тубинская площадь располагается в области сочленения Присяяно-Енисейской синеклизы и Непско-Ботуобинской антеклизы. Ее центральная часть характеризуется сложным геологическим строением. По результатам интерпретации аномального магнитного поля профиль 3 полностью находится в области развития пород траппового комплекса, залегающего преимущественно на глубине порядка 2÷3 км от дневной поверхности. Он пересекается системой зон разноориентированных глубинных разломов (рис. 1), выделяемых по комплексу геологических и геофизических данных.

Анализ результатов ранее проведенных электроразведочных работ различными партиями ФГУНПП (ПГО) «Иркутскгеофизика» показал, что перечисленные геологические факторы определяют сложное, неоднородное строение изучаемой территории в геоэлектрическом

плане. Интрузии траппов в основном внедряются по ослабленным зонам, разломам с изменением гипсометрического уровня. Такие зоны в методе ЗСБ отмечаются градиентным изменением параметров. Сами интрузии траппов в принципе являются объектами относительно высокого удельного электрического сопротивления и при значительных размерах могут служить опорными горизонтами для электроразведочных методов. Однако трещиноватые трапповые тела на контактах с вмещающими породами обуславливают значительное увеличение электропроводности разреза за счет ионной проводимости рассольных вод, заполняющих трещины траппов и приконтактные к траппам участки разреза.

Таким образом, совокупность указанных факторов может привести к появлению в геоэлектрическом раз-

резе локальных горизонтальных неоднородностей как повышенного, так и пониженного удельного сопротивления относительно нормального разреза, а также образование мощных зон проводимости. Последнее подтверждается результатами работ магнитотеллурическими методами в районе профиля 3. Здесь в результате переинтерпретации фоновых материалов по суммарной продольной проводимости осадочного чехла ($S_{\text{сумм}}$) выделена интенсивная зона повышенных значений этого параметра, в пределах которой и располагается профиль. Природа рассматриваемой аномалии, вероятно, комплексная (наличие разломов, развитие траппов).

Таким образом, полевое опробование методом СТЕМ проводилось в весьма сложных геоэлектрических условиях, затрудняющих интерпретацию полевых данных в рамках горизонтально-слоистой модели среды.

Геолого-геофизическое строение в районе Троицко-Михайловского вала [2]

Территория района работ в пределах линейных дислокаций на границе Енисейского кряжа и Присяяно-Енисейской синеклизы и в пределах борта Присяяно-Енисейской синеклизы формировалась в зоне фациальных переходов от континентальных и прибрежно-морских условий осадконакопления к классическим для этого периода на Сибирской платформе условиям формирования терригенно-карбонатных, галогенно-карбонатных и карбонатных отложений.

Отмечается непрогнозируемое изменение геоэлектрических параметров разновозрастных толщ и, как следствие, отсутствие в рассматриваемом интервале разреза опорных, стратиграфически привязанных геоэлектрических горизонтов.

Наиболее устойчиво проводящими горизонтами проявляются терригенные отложения, главным образом, за счет присутствия глинистых фракций, а начиная с глубин около 1 км и глубже — также и за счет заполнения коллекторов-песчаников высокоминерализованными растворами в интервале разреза от архея — протерозоя до мезозоя.

Как весьма высокоомные с удельными электрически-

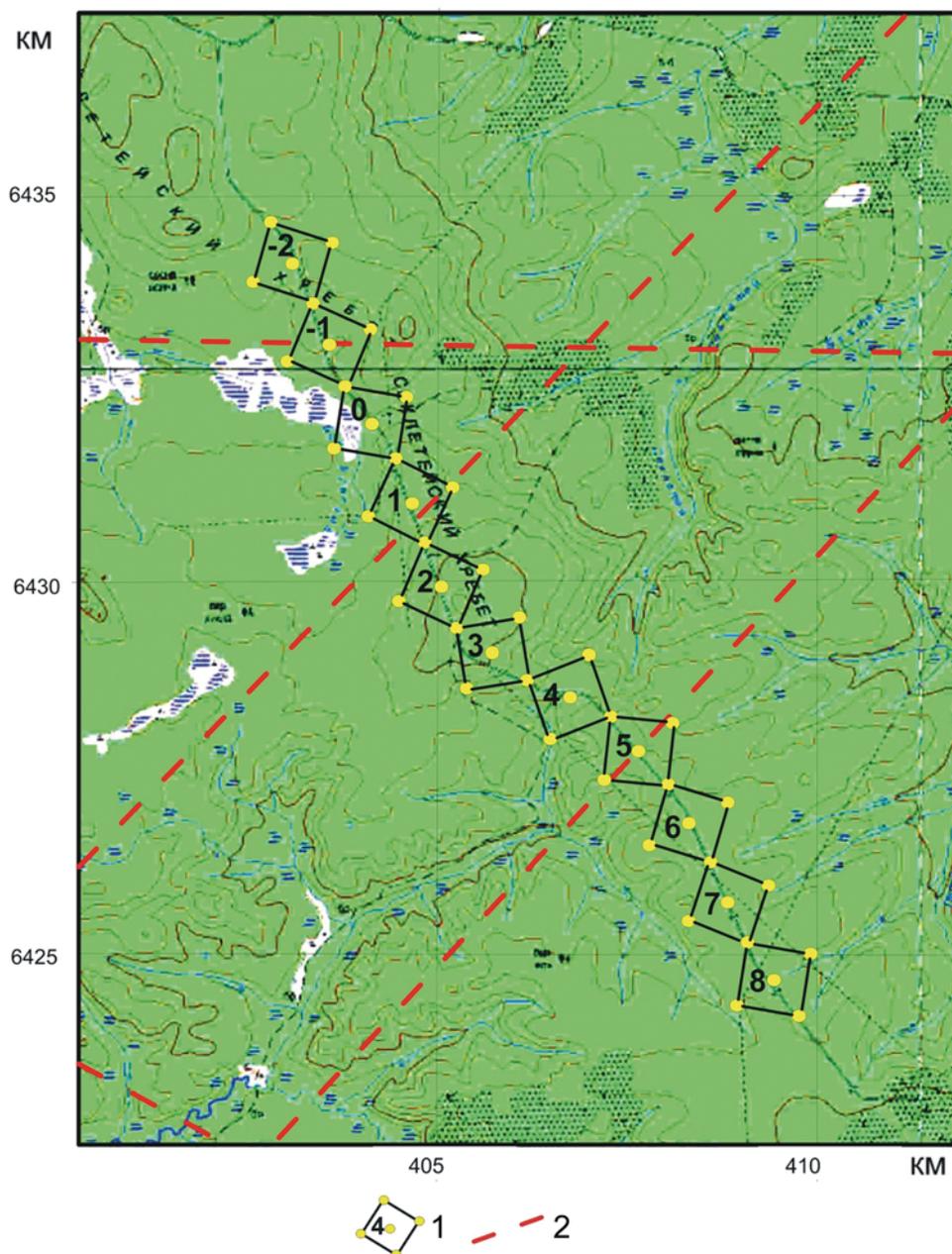


Рис. 1. Тубинская площадь. Положение генераторных (приемных) петель на профиле 3: 1 — положение петель 800x800 м и их номера; 2 — оси зон глубинных разломов, выделенных по комплекс-у геологических и геофизических данных

ми сопротивлениями от 300 — 500 Ом·м до нескольких тысяч Ом·м достоверно выделяются кристаллические и метаморфизованные образования архея и протерозоя.

Карбонатные и галогенно-карбонатные образования характеризуются сопротивлениями порядка нескольких сот омметров.

Методика работ

На Тубинской площади одновитковые квадратные генераторная и приемная петли 800×800 м из медного провода ГПМП-6 раскладывались по профилю в виде двух смежных ромбов с расстоянием между центрами около 1130 м. На рис. 1 показаны положения этих петель на профиле. Каждая из них поочередно служила генераторным и приемным контуром. Генераторная петля всегда находилась юго-восточнее приемной. Аппаратура (СТЕМ -1 или Цикл-7) размещалась в центре установки между генераторной и приемной петлями. В центре приемной петли располагалась малая 24-витковая петля 20×20 м с согласующим усилителем, связанная с комплексом СТЕМ-1 дополнительным двойным проводом длиной ~ 600 м.

Измерения с комплексом СТЕМ-1 и системой Цикл-7 проводились с одной и той же установкой, как правило, в течение одного дня. Комплексом СТЕМ-1 возбуждались специальные псевдослучайные троичные последовательности полусинусоидальных импульсов тока в генераторной петле и регистрировалось напряжение на резисторе 0.1 Ом, включенном последовательно с генераторной петлей, а также напряжение в приемных петлях 800×800 м и 20×20 м синхронно с импульсами тока и в паузах между ними. Дополнительно регистрировалось напряжение в приемной петле 800×800 м только в паузах между импульсами тока. Таким образом, одновременно измерялись 4 параметра. Затем определялись импульсные характеристики в частотном окне h_F [1].

Режимы измерений с комплексом СТЕМ-1 показаны в табл. 1, где n — порядок последовательности, T_i — длительность импульса тока, N_i — количество импульсов в пакете, $T_p = 2 T_i \times N_i$ — длительность пакета, $F1 = 1/T$ — нижняя частота окна, $F2 = 1/(2 T_p)$ — верхняя частота окна, $T = 2 T_i (2^n - 1) N_i$ — длительность специальной псевдослучайной троичной последовательности ПСТП, N_n — число накоплений в одном цикле измерений, $N_{повт}$ — число циклов измерений. Номинальное напряжение блока питания генератора составляло 100 В, номинальный ток в импульсе — 10 А. На участке Троицко-Михайловского вала использовалась

Таблица 1
Режимы полевых измерений с комплексом СТЕМ-1

2^n	T_i , мс	N_i	T_p , мс	$F1$	$F2$	T , мс	N_n	$N_{повт}$
8	0.5	1	1.0	3.9	500	255	8	64-256
5	0.5	5	5.0	0.78	100	155	8	64
5	0.5	15	15.0	0.26	34	465	8	64
8	7.5	1	15.0	0.26	34	3825	8	64
5	7.5	5	75.0	0.43	6.5	2325	8	64
5	7.5	15	225.0	0.14	2.2	6975	8	64
5	7.5	30	450.0	0.072	1.1	13950	8	32
5	7.5	45	675.0	0.048	0.55	20925	8	32

Таблица 2
Режимы полевых измерений с системой ЦИКЛ-7

Режимы	Установка, мс	Фактически, мс
Длительн. импульса тока	500	611.7
Длительность паузы	500	628.29
Число накоплений	256	256×6
Амплитуда тока	5 А	4.5-4.7А

практически та же установка с такими же режимами работы и номинальным током в импульсе 5 А без малой приемной петли.

После окончания измерений на данном пикете вторая по ходу движения петля переносилась вперед на юго-восток. Таким образом, обеспечивалась съемка по профилю с шагом, равным диагонали большой петли, при минимальных трудозатратах на перемещение измерительной установки. Такая методика позволила реализовать максимальную чувствительность приемника нестационарного магнитного поля при отсутствии паразитных электрических наводок от генераторной петли. Кроме того, выбранная установка практически нечувствительна к эффекту суперпарамагнетизма, часто связанного с траппами, которые широко развиты в районе работ. Известно, что над горными породами с суперпарамагнитной минерализацией (в частности, над траппами, излившимися на поверхность земли) при отсутствии в разрезе проводящих объектов наблюдается интенсивный медленно спадающий переходный процесс. По мере удаления приемника от генераторной петли этот процесс резко уменьшается и пропадает [3, 4]. Эта методика позволила также сравнить реальные чувствительности приемника нестационарного магнитного поля на основе малой 24-витковой петли и одновитковой петли 800×800 м. Всего было выполнено 11 зондирований на профиле длиной около 12.5 км на Тубинской площади и 6 зондирований на профиле длиной около 20 км на участке Троицко-Михайловского вала.

Режимы измерений с системой Цикл-7 показаны в табл. 2. Измерения производились при сопоставимых произведениях мощности генераторов комплекса СТЕМ-1 и системы Цикл-7 на полное число накоплений.

Суммарные затраты времени на измерения с комплексом СТЕМ-1 в режимах, обеспечивающих определение полного набора импульсных характеристик в частотных окнах (без учета времени обработки) — 4 ч 7 мин.

Результаты измерений и обработки данных

В качестве примеров непосредственно измеряемых величин на рис. 2 показаны вырезки из псевдослучайных последовательностей импульсов тока (напряжение на резисторе 0.1 Ом, последовательно включенным с генераторной петлей) длительностью $T_i = 0.5$ мс (а) и $T_i = 7.5$ мс (б) в генераторной петле и вырезки из соответствующих им последовательностей импульсов напряжения в приемной петле 800×800 м. Импульсы тока имеют полусинусоидальную форму. Импульсы напряжения имеют косинусоидальную форму, искаженную за счет сигналов вторичного поля.

Приведены примеры типичных импульсных характеристик h_F разреза в частотных окнах на профиле 3, на

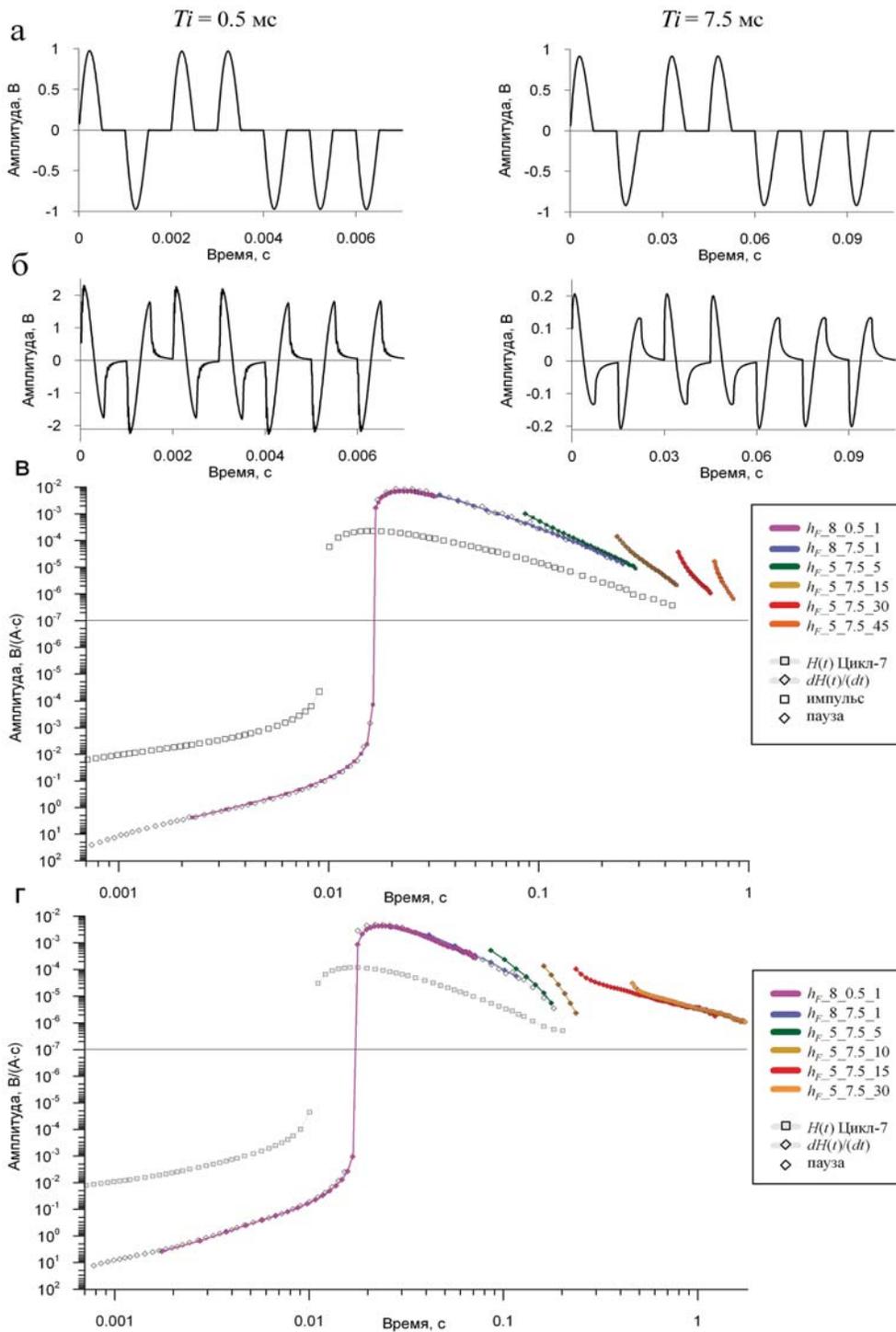


Рис. 2. Вырезки из псевдослучайных последовательностей импульсов тока длительностью $T_i = 0.5$ мс (а) и $T_i = 7.5$ мс (б) в генераторной петле и из последовательностей импульсов на-пряжения в приемной петле. Импульсные характеристики в частотных окнах на Тубинской площадке (в) и участке Троицко-Михайловского вала (г)

Тубинской площадки пк 1.5 (рис. 2в) и на участке Троицко-Михайловского вала профиль 51 пк 1 (рис. 2г). Там же приводятся переходные характеристики $H(t)$ и их производные $dH(t)/dt$ по результатам измерений с системой Цикл-7. Импульсные характеристики в частотных окнах представляют собой наборы кривых, напоминающие те, которые получены путем физического и численного моделирования [1].

Импульсные характеристики на фоне импульсов тока h_{F1} и в паузах между ними h_{F2} практически совпадают, их точки принадлежат одним и тем же кривым (рис. 2в). Начальные импульсные характеристики хорошо совпадают с производными от переходной характеристики, измеренной системой Цикл-7, что само по себе свидетельствует о достоверности определения h_F . На Тубинской площадке длительность h_F для пакетов с большим числом импульсов (до $N_i = 45$) около 1 с (длительность переходной характеристики около 0.3 — 0.5 с). Импульсные характеристики h_F по измерениям в приемной петле 20×20 м практически не отличаются от h_F по измерениям в приемной петле 800×800 м. Это означает, что реальная чувствительность приемника на основе малой многовитковой петли 20×20 м близка к чувствительности петли 800×800 м.

На участке Троицко-Михайловского вала длительность h_F для пакетов с большим числом импульсов (до $N_i = 30$) около 2 с и более (длительность переходной характеристики около 0.2 — 0.3 с). На этом участке особенно интересны импульсные характеристики на пикетах 1 (рис. 2г) и 2 профиля 51. До времени 0.1 с импульсные характеристики полностью соответствуют производной от переходной характеристики $H(t)$, к моменту 0.2 с переходный процесс заканчивается для $H(t)$ и h_F ($N_i = 5$). О завершении первой стадии переходного процесса свидетельствует

резко увеличенная крутизна кривой h_F при $N_i = 10$, но при $N_i = 15$ и 30 импульсные характеристики выполаживаются и продолжают до 2 с. На этом примере, видно, что новый метод обладает более высокой глубиной и разрешающей способностью, чем традиционный метод, поскольку h_F прослеживаются до 2 с, а $H(t)$ только до 0.2 с и, кроме того, h_F более чувствительны к изменению времени t , а следовательно, и к $t/(\sigma \times l^2)$,

т.е. к свойствам разреза, где σ — электропроводность, а l — линейные размеры (мощность) проводящих пластов.

Интерпретация результатов полевых наблюдений

С помощью программы *ShellLoop-1D* (А.А. Петров) по наборам импульсных характеристик на каждом пикете (рис. 2в) был построен геоэлектрический разрез по профилю 3 (рис. 3а). Аналогичный разрез по измерениям с аппаратурой Цикл-7, полученный с помощью программы ПОДБОР [5], приведен на рис. 3б. Глубина разреза (СТЕМ-1) до высокоомного фундамента достигает 5 км (рис. 3а), глубина разреза (Цикл-7) — в 2 раза меньше. До глубины в 2,5 км разрезы (СТЕМ-1) и (Цикл-7) в основном совпадают. Следует отметить, что разрез, полученный по измерениям с системой Цикл-7 в 2014 г., по глубинам проводящих слоев и всего разреза близок к разрезу, выполненному А.К. Захаркиным (СНИИГГиМС) по измерениям с системой Цикл-7 на указанном профиле в 2013 г. (генераторная петля 500×500 м и многовитковая приемная рамка 3×3 м, эквивалентная петле площадью 500×500 м, ток в импульсе 146 А). Таким образом, глубинность метода ЗСБ даже при 15-кратном увеличении тока в 2 раза меньше, чем в методе СТЕМ.

На рис. 4 приведен геолого-геофизический разрез по профилю 3. Основу разреза составляет сейсмоэлектрическая модель, представленная глубинным сейсмическим разрезом и дополненная обобщенными для исследуемого района электрическими свойствами горных пород между отражающими сейсмическими границами. На указанной модели выделены следующие комплексы горных пород и отдельные стратиграфические подразделения с соответствующими наиболее вероятными диапазонами изменения

значений продольного удельного электрического сопротивления ρ :

нерасчлененный по сейсмическим данным надсолевой комплекс неоднородных по электрическим свойствам ($\rho = 5\div 600$ Ом·м) туфогенных отложений триаса с более молодыми рыхлыми породами, терригенных отложений пермо-карбона, силура-среднего ордовика и карбонатно-терригенной толщи усть-кутской (ордовик) и верхоленской (верхний кембрий) свит;

карбонатно-галогенный комплекс среднего и нижнего кембрия, включающий чередующиеся горизонты карбонатов, каменной соли ($\rho = 100\div 200$ Ом·м) литвинцевской и ангарской свит, верхнебельской подсвиты, усольской свиты, осинского пласта усольской свиты, а также трещиноватые доломиты, карбонатно-терригенные породы ($\rho = 10\div 30$ Ом·м) булайской свиты и среднебельской подсвиты;

подсолевой комплекс нижнего кембрия — венда карбонатно-терригенной толщи мотской свиты ($\rho = 30\div 40$ Ом·м), включающей верхне-среднемотскую и нижне-немотскую подсвиты;

рифей — глинистые сланцы, филлиты, алевролиты, кварциты ($\rho = 100\div 300$ Ом·м);

кристаллический фундамент (нижний протерозой — архей) — граниты, гранито-гнейсы, гнейсы, амфиболиты ($\rho = 200\div 2000$ Ом·м).

Эта модель не осложнена локальными горизонтальными неоднородностями и ее можно считать нормальным геоэлектрическим разрезом профиля 3.

На геолого-геофизический разрез вынесены результаты формальной интерпретации кривых зондирования метода СТЕМ, интерпретационные границы по данным этого метода между отдельными стратиграфи-

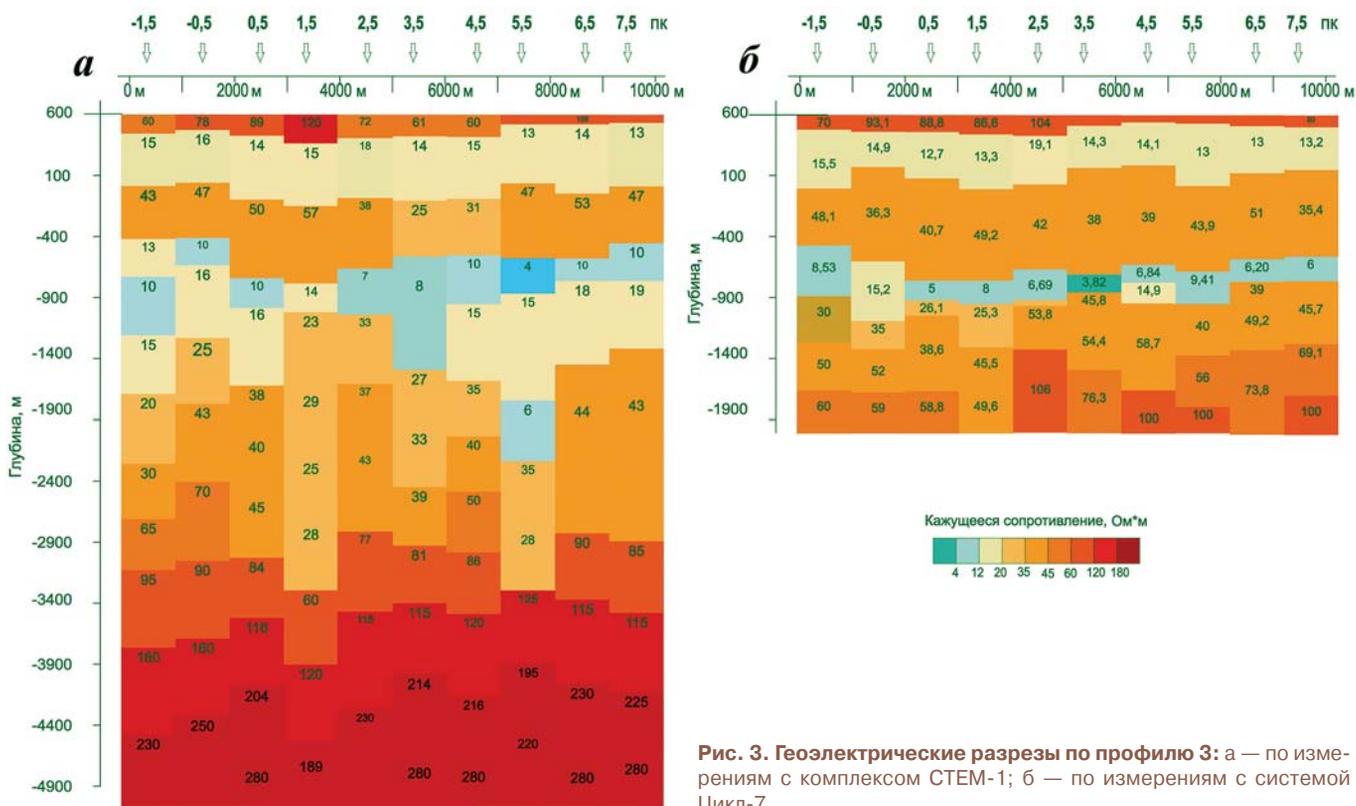


Рис. 3. Геоэлектрические разрезы по профилю 3: а — по измерениям с комплексом СТЕМ-1; б — по измерениям с системой Цикл-7

ческими подразделениями, аномальные объекты пониженного и повышенного относительно нормального разреза удельного электрического сопротивления и предполагаемые тектонические нарушения.

Анализ рис. 4 показывает, что в верхней части разреза в надсолевой толще (по материалам сейсморазведки не расчленяется) по данным метода СТЕМ достаточно уверенно выделяются четыре слоя.

Верхний слой мощностью в первые сотни метров, вероятно, можно отождествить с недифференцируемой с выбранными установками и режимами измерений маломощной толщей туфогенных отложений триаса и более молодых рыхлых горных пород с общим эффективным удельным сопротивлением $60 \div 120$ Ом·м.

Второй слой со средней мощностью около 500 м и достаточно выдержанными значениями ρ около 15 Ом·м, скорее всего, отражает суммарную толщу терригенных отложений пермо-карбона, силура и среднего-верхнего ордовика, что согласуется с электрическими свойствами этих горных пород и имеющимися данными об их мощности в районе профиля 3.

Ниже располагается слой карбонатно-терригенной толщи усть-кутской и большей части верхоленской свит мощностью примерно $400 \div 600$ м с более высокими значениями ρ до 57 Ом·м.

Нижняя часть верхоленской свиты располагается в подошве надсолевого комплекса и характеризуется в зависимости от тектонической ситуации диапазоном изменения удельного электрического сопротивления от 4 до 14 Ом·м.

Следует отметить, что среднее расхождение в определении глубины залегания подошвы надсолевой толщи по сейсмо- и электроразведочным данным метода СТЕМ, исключая одну аномальную точку в середине профиля, обусловленных горизонтальной неоднородностью разреза, составляет 7% , что является весьма удовлетворительным для такой сложной геологической обстановки.

В силу изложенных выше осложняющих факторов наиболее неоднородным, отличающимся от нормальной модели геоэлектрического разреза, является карбонатно-галогенный комплекс. В целом он характеризуется аномально низкими значениями продольного удельного электрического сопротивления отдельных свит, не превышающими $40 \div 70$ Ом·м по сравнению с нормальными значениями в естественном залегании неизмененных карбонатных пород и каменной соли ($\rho = 100 \div 200$ Ом·м). Это в значительной степени затрудняет расчленение рассматриваемой части разреза и геологическую идентификацию некоторых слоев (всего 6 слоев). Тем не менее, как показывает анализ рис. 4, на большинстве участков разреза наблюдается удовлетворительное совпадение сейсморазведочных и электроразведочных границ, как подошвы рассматриваемого комплекса, так и его отдельных стратиграфических подразделений. При этом среднее расхождение в определении глубины залегания подошвы карбонатно-галогенной толщи по сейсмическим (абс. отм. около -2.7 км) и электроразведочным данным, за исключением аномальных участков, где она по величине ρ не

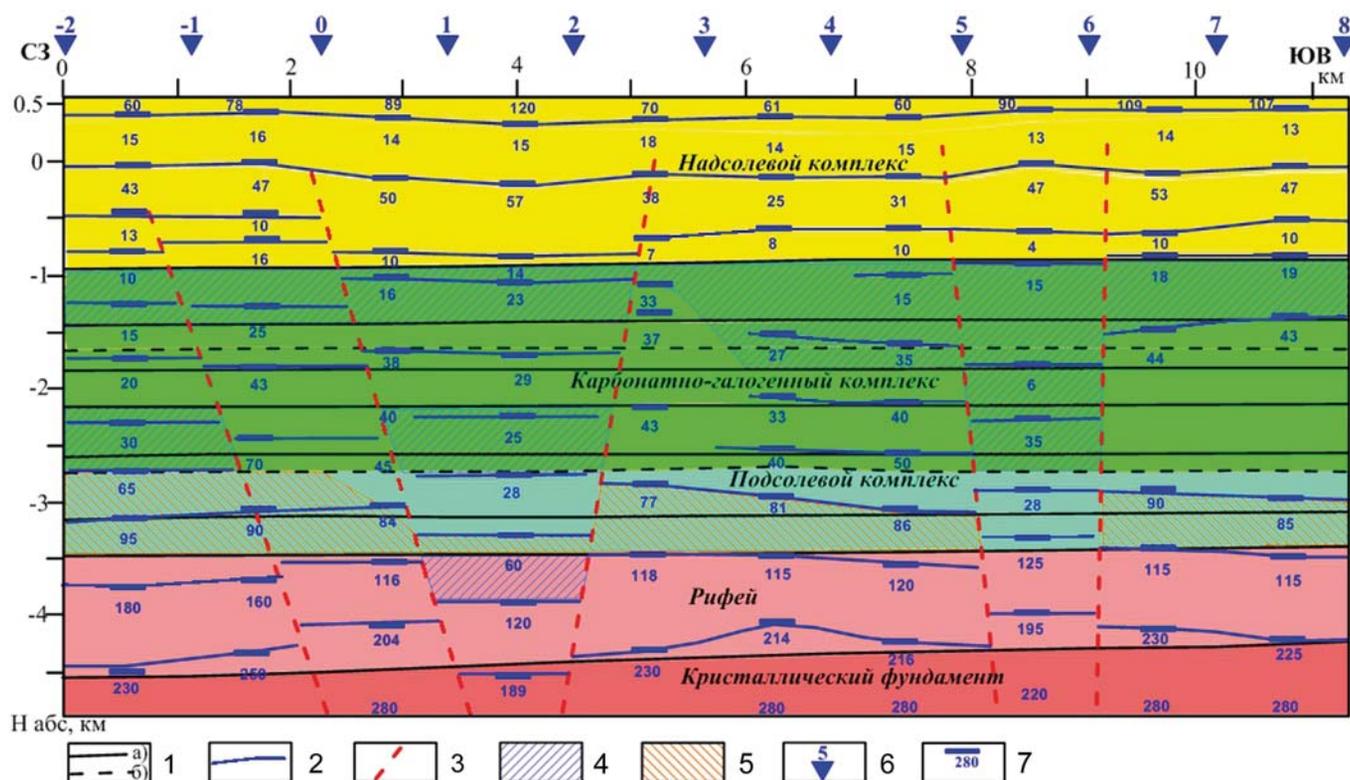


Рис. 4. Геолого-геофизический разрез по профилю 3 с результатами интерпретации данных СТЕМ-1: 1 — сейсмические границы, выделенные: а — уверенно, б — предполагаемые; 2 — границы, выделенные по данным СТЕМ; 3 — предполагаемые разрывные нарушения; зоны (объекты) аномальных значений ρ : 4 — пониженных, 5 — повышенных; 6 — расположение на профиле центров петель СТЕМ и их номера; 7 — результаты формальной интерпретации данных СТЕМ в отдельных пунктах (границы и значения ρ , Ом·м)

отличается от залегающего ниже по разрезу подсолевого комплекса пород, составляет всего 5 %.

Подсолевой карбонатно-терригенный комплекс, залегающий в диапазоне глубин с абс. отм. примерно $-2.7 \div -3.5$ км, согласно нормальной модели среды представлен двумя идентичными по электрическим свойствам подсвитами мотской свиты. Они выделяются и по результатам интерпретации данных СТЕМ, но в целом характеризуются более высокими величинами удельного электрического сопротивления (до $80 \div 90$ Ом·м), особенно на уровне нижнемотской подсвиты. Возможные причины этого будут рассмотрены далее.

Расположенная ниже по разрезу толща рифея достаточно уверенно отделяется границей раздела от подсолевого комплекса согласно нормальной геоэлектрической модели повышенными значениями удельного электрического сопротивления ($\rho \geq 115$ Ом·м). Эта граница, однако, в основном проходит несколько ниже сейсмической границы. При этом среднее расхождение в определении глубины залегания, за исключением аномальной точки между пунктами зондирования 1 и 2, составляет менее 3 %.

Кровля кристаллического фундамента по данным СТЕМ также уверенно выделяется на глубине с абсолютной отметкой около -4.5 км (5.1 км с учетом высоты рельефа 600 м) по более высоким значениям ρ , превышающим 200 Ом·м. На отдельных участках она располагается несколько выше сейсмической границы, но расхождение в их положении в разрезе не превышает 4 %.

Таким образом, несмотря на сложное геоэлектрическое строение в районе профиля в целом наблюдается вполне удовлетворительное совпадение сейсмических и электроразведочных границ практически по всему разрезу. Данный факт свидетельствует о достоверности получаемых результатов и высокой эффективности метода СТЕМ при исследованиях в условиях значительной мощности осадочного чехла на глубинах до пяти и более километров.

Дополнительным критерием достоверности выполненных построений является сопоставление результатов определения суммарной продольной проводимости осадочного чехла, полученных методом СТЕМ и по материалам проведенных ранее магнитотеллурических исследований в районе профиля 3. По этим данным диапазон изменения величины $S_{\text{сумм}}$ в различных пунктах зондирования здесь составляет $147 \div 270$ См, а по данным СТЕМ — $144 \div 288$ См, что практически идентично.

Выделенные по результатам интерпретации данных СТЕМ в рифейской толще и в карбонатно-галогеном комплексе локальные неоднородности пониженного удельного сопротивления, очевидно, можно отождествить с зонами развития разрывных нарушений, широко представленных на разрезе, а также трещиноватыми трапповыми телами на контактах с вмещающими карбонатными породами повышенной общей пористости.

Локальные неоднородности повышенного удельного сопротивления в подсолевом комплексе, вероятно, можно связать с неизменными трапповыми интрузиями. Однако, учитывая то обстоятельство, что профиль 3

располагается в пределах площади, перспективной на выявление залежей углеводородов, выделенной по комплексу геофизических, геоэлектрохимических и атомохимических методов, отдельные неоднородности повышенного удельного сопротивления или их части могут быть связаны с такими залежами.

Заключение

Сравнение импульсных характеристик разреза в частотных окнах по методу СТЕМ, полученных в Восточной Сибири, с переходными характеристиками традиционного метода ЗСБ показало, что они содержат информацию о более поздней низкочастотной стадии переходного процесса, возбуждаемой более глубокими частями разреза. Значительно большая крутизна импульсных характеристик свидетельствует о более тесной их связи с приращением электропроводности и размеров геологических образований, т.е. о большей разрешающей способности метода СТЕМ.

Результаты геологической интерпретации данных опробования метода СТЕМ в полевых условиях в Иркутской области в 2014 г. и данных наблюдений методом ЗСБ с электроразведочной системой Цикл-7 показали существенные преимущества нового метода. В частности, в сложных геоэлектрических условиях, обусловленных интенсивной тектоникой и развитием траппового комплекса, была обеспечена глубинность исследования порядка 5 км. Глубинность метода ЗСБ при сопоставимых мощностях генератора и количестве накоплений сигнала оказалась в 2 раза меньше. При этом методом СТЕМ надежно расчленяется разрез надсолевого, карбонатно-галогенового и подсолевого комплексов с отдельными свитами, кровли рифейских отложений и кристаллического фундамента. Полученный разрез вполне удовлетворительно согласуется с данными сейсморазведки. Выделенные аномальные объекты повышенных и пониженных значений удельного электрического сопротивления предположительно отождествляются с областями развития траппов, с карбонатными породами повышенной общей пористости. Отдельные неоднородности повышенного удельного сопротивления в подсолевом комплексе могут быть связаны с залежами углеводородов.

Таким образом, результаты полевого опробования нового метода импульсной электроразведки СТЕМ и программно-аппаратного комплекса СТЕМ-1 так же, как результаты физического и математического моделирования [1], свидетельствуют о его существенно большей глубинности и разрешающей способности по сравнению с традиционным методом. Можно ожидать, что внедрение в практику геологоразведочных работ новой конкурентоспособной и экономичной технологии электромагнитного зондирования недр СТЕМ значительно повысит эффективность проводимых геологоразведочных работ на нефть, газ и другие виды полезных ископаемых.

ЛИТЕРАТУРА

1. Великин А.Б., Великин А.А. Новый корреляционный метод импульсной электроразведки с шумоподобными сигналами СТЕМ // Разведка и охрана недр. — 2016. — № 2. — С. 47–54.
2. Ефимов А.С., Тригубович Г.М., Белая А.А. и др. // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015. XI Междунар. науч. конгресс и выставка: Междунар. науч.

конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология» в 3 т. — Новосибирск: СГУГиТ, 2015. — Т. 2. — С. 151–155.

3. Захаркин А.К., Бубнов В.М., Крыжановский В.А., Тарло Н.Н. Магнитная вязкость горных пород — новый осложняющий фактор метода ЗСБ / Поиск полезных ископаемых в Сибири методом зондирования становлением поля. — Новосибирск, СНИИГГиМС, 1988. — С. 19–26.

4. Кожеников Н.О., Снопков С.В. Магнитная вязкость траппов и ее связь с аномалиями электромагнитного поля в методе переходных процессов (Якутская кимберлитовая провинция) // Геология и геофизика. — 1995. — Т. 36(5). — С. 91–102.

5. Могилатов В.С., Захаркин А.К., Злобинский А.В. Математическое обеспечение электроразведки ЗСБ. Система «Подбор». — Новосибирск: НП Академ. изд-во «Гео», 2007. — С. 155.

© Коллектив авторов, 2016

Великин Александр Борисович // avelikin@mail.ru

Великин Алексей Александрович // aavelikin@mail.ru

Алексеев Евгений Петрович // geo@geolraz.com

Королев Алексей Александрович // koroleff210@rambler.ru

Черныш Владимир Юльевич // vlachernysh@yandex.ru

ГИДРОГЕОЛОГИЯ И ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ

УДК 556+624.131

Ермолаева А.В., Строкова Л.А. (Национальный исследовательский Томский политехнический университет)

ОЦЕНКА КАРСТОВОГО ПРОЦЕССА С ПОМОЩЬЮ ХИМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОД ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ МАГИСТРАЛЬНОГО ГАЗОПРОВОДА

*Рассмотрено влияние химического состава подземных вод на развитие карстового процесса. По имеющимся данным инженерно-геологических изысканий начального участка проектируемого магистрального газопровода «Сила Сибири» (участок Чаянда-Ленск) произведен расчет индекса неравновесности вод по отношению к кальциту. Установлены зависимости между геоморфологическими особенностями рельефа и агрессивностью природных вод. **Ключевые слова:** грунтовые воды, карст, химический состав, равновесие.*

Ermolaeva A.V., Strokova L.A. (Tomsk Polytechnic University)

EVALUATION OF KARST PROCESS BY USING CHEMICAL CHARACTERISTICS OF WATERS IN THE CONSTRUCTION OF MAIN GAS PIPELINES

*This study focuses on the use of geotechnical information to identify the effect of chemical composition of ground water in karst development process. We calculated an index of non-equilibrium water relative to calcite according to available data of geotechnical investigations for the designed main gas pipeline «Power of Siberia» (first section Chayanda-Lensk). It is analyzed the relationship between geomorphological features of the terrain and aggressiveness of natural waters. **Key words:** shallow groundwater, karst, chemical composition, equilibrium.*

На сегодняшний день ключевыми критериями, предъявляемыми к газотранспортным системам, являются промышленная и экологическая безопасности. Как правило, эксплуатация магистральных газопроводов протекает в сложных динамических, инженерно-геологических и природно-климатических условиях. Особые трудности возникают при строительстве объектов трубопроводного транспорта на закарстованных территориях ввиду сложности идентификации и прогнозирования развития процесса. Источниками разрушения газопро-

водов в этих случаях являются механические напряжения, превысившие предел прочности металла трубопровода, возникшие вследствие просадки грунта в зоне карстовой воронки. Можно выделить следующие факторы, способствующие возникновению отказов:

недооценка опасности процесса на стадии проектирования;

отступление от проектных решений при строительстве.

Одной из ключевых проблем в методике изучения и оценки закарстованных территорий считается оценка опасности карстового процесса. Действующие в России строительные нормы предписывают в качестве единственных количественных критериев оценки карстовой опасности интенсивность образования карстовых провалов и их средние диаметры, причем это касается как инженерно-геологических изысканий, так и выбора защитных мероприятий, хотя иногда на этот счет высказываются обоснованные сомнения [7, 8].

В результате анализа исследований, проводимых как в России, так и за рубежом [3, 5, 11], можно выделить ряд признаков, характеризующих карстовую опасность:

наличие поверхностных форм карста;

растворяющая способность природных вод;

наличие зоны разуплотненных грунтов, фиксируемых по геоэлектрическим и скоростным аномалиям;

интенсивная вертикальная фильтрация;

наличие (отсутствие) водоупора, перекрывающего растворимые породы.

Среди этих данных можно отметить признак, характеризующий прогноз развития карстового процесса во времени-пространстве: агрессивность природных вод. Так как данный признак описывает «поведение» и интенсивность процесса в целом, то оценка на его основе перспективна не только на этапе проектирования, но и на этапе эксплуатации магистрального газопровода.

В естественных условиях система «вода-порода» носит равновесно-неравновесный характер. Согласно данному положению вода, независимо от глубины залегания и скорости движения, всегда не равновесна с одними минералами, растворяя их, но равновесна с другими, которые формирует. В настоящий момент теория взаимодействия воды с горными породами относительно детально разработана с общих геохимиче-