

РУБРИКА: МАТЕРИАЛЫ КОНФЕРЕНЦИИ

Особенности инверсии данных зондирования становлением поля в ближней зоне в сложных структурно-тектонических условиях

Мурзина Е. В. (ООО «СИГМА-ГЕО»), Мисюркеева Н.В. (ООО «СИГМА-ГЕО»), Шарлов М. В. (ООО «СИГМА-ГЕО»), Агафонов Ю. А. (ООО «СИГМА-ГЕО»)

При решении нефтегазопроисловых задач методом зондирования становлением поля в ближней зоне (ЗСБ) в пределах осадочного чехла Непско-Ботубинской антиклизы и Ангари-Ленской ступени применяется 1D инверсия в рамках квазигоризонтально-слоистых сред или латеральная закрепленная инверсия. Ввиду расширения географии работ и перехода на территории с более сложным геологическим строением возрастает актуальность адаптации существующих алгоритмов автоматической инверсии данных ЗСБ к решению более сложных геологических задач. Задачами электроразведки здесь являются не только оценка перспективных в нефтегазональном отношении интервалов в сложных структурно-тектонических условиях, но и картирование положения кровли фундамента по данным ЗСБ. Решение поставленных задач проводилось путем построения структурной модели двумя способами: без учета данных сейморазведки методом общей глубинной точки (МОГТ) и с учетом отбивок основных стратиграфических комплексов по данным МОГТ. В тезисах рассмотрены результаты применения двух методических подходов и показаны некоторые возможности ЗСБ для изучения глубинного строения осадочного чехла и сложных геологических объектов фундамента.

Ключевые слова: зондирования становлением поля в ближней зоне; латеральная закрепленная инверсия; квазигоризонтально-слоистые модели; Непско-Ботубинская антиклиза; Ангари-Ленская ступень; Анабарская антеклиза, Вилуйская синеклиза.

Peculiarities of transient electromagnetic sounding data inversion in complicated structural-tectonic conditions

Murzina E. V. ("Sigma-GEO" LLC), Misyurkeeva N.V. (ООО «SIGMA-GEO»), Sharlov M. V. ("Sigma-GEO" LLC), Yu. A. Agafonov ("SIGMA-GEO" LLC)

When solving oil and gas exploration tasks using the method of high-density near-field transient EM sounding (TEM-sounding) within the sedimentary cover of the Nepa-Botuoba anticline and the Angara-Lena stage, 1D inversion is applied within the framework of quasi-horizontally layered media or lateral constrained inversion. Due to the expansion of the geography of work and the transition to territories with more complex geology structure the need to adapt existing algorithms for automatic inversion of TEM data is becoming

urgent in order to solve more complex geological problems. The tasks of electrical exploration here are not only to assess the oil and gas potential of target intervals in complex structural and tectonic conditions but also to map the position of the top of the basement using TEM data. The solution to the tasks was carried out by constructing a structural model using two methods: excluding seismic data using the common depth point method (CDPM) and including the tops of the main stratigraphic sequence according to CDPM. The abstract considers the results of using two methodological approaches and show some of the possibilities of the TEM-sounding for studying the deep structure of the sedimentary cover and complex geological features of the basement.

Keywords: near-field time-domain electromagnetic sounding, lateral constraint inversion, quasi- horizontally layered model, Nepa-Botuoba anteklise, Angara-Lena stage, Anabar Anteklise, Vilyuysk syneklise.

Введение

Применение комплекса методов сейсморазведки МОГТ и электроразведки ЗСБ получило широкое распространение на территории юга Восточной Сибири при решении нефтегазопроисловых задач. Геологическая эффективность применения метода ЗСБ на территории Непско-Ботубинской антеклизы (НБА) и Ангало-Ленской ступени (АЛС) обусловлена соответствующими петрофизическими характеристиками перспективных в нефтегазоносном отношении горизонтов-коллекторов, являющихся контрастными объектами для картирования их электроразведкой. При переходе на новые территории, расположенные северо-восточнее НБА и характеризующиеся увеличением мощности осадочного чехла, перед методом ЗСБ возникают новые задачи – определение положения кровли фундамента и, параллельно, изучение перспектив нефтегазоносности по данным ЗСБ на территориях со сложным структурно-тектоническим строением. В тезисах рассмотрены результаты применения нескольких методических подходов построения модели при 1D инверсии и показаны некоторые возможности ЗСБ для изучения глубинного строения осадочного чехла.

Обзор существующих подходов решения обратных задач электроразведки

Для процесса оценки параметров модели по наблюдаемым данным обычно используется обратная задача, или инверсия. В большинстве случаев изучаемый электроразведочными методами геологический разрез возможно аппроксимировать квазигоризонтально-слоистой геоэлектрической моделью при помощи 1D инверсии [12, 2, 3].

Решение обратной задачи заключается в определении параметров изучаемой среды, оценке геологической совместимости с данными наблюдений и в определении приближенных решений для принятой модели путем минимизации невязки между практической и теоретической кривыми ЗСБ. В автоматическом режиме решение обратной задачи происходит за счет применения стандартных алгоритмов оптимизации (регулярных (Покоординатный спуск, метод Нелдера-Мида) и стохастических методов (Монте-Карло)).

Точность построения модели и результат решения обратной задачи зависит не только от оптимальности нахождения минимума целевой функции, но и от заложенной априорной информации, поэтому, чем ближе к истине стартовая модель, тем выше достоверность результата. Это известно из теории обратных задач, которые в 60-е гг. прошлого века описал российский математик А.Н. Тихонов [8]. Он ввел в решение обратной задачи метод регуляризации, который был основан на приближении некорректно поставленной задачи некоторой последовательности корректно поставленных задач. Однако на практике

в России подход к регуляризации обратной задачи электроразведки применим слабо, в том числе при автоматизации процесса инверсии, и получил свое развитие только в последние годы [2, 3].

В 1994 г. первые алгоритмы, направленные на регуляризацию обратной задачи при автоматической инверсии, были представлены зарубежными исследователями Д.У. Ольденбургом и Я. Ли (2005), М.Х. Локе и Р.Д. Баркером (1996). Эти алгоритмы создают гладкие модели в разрезе с минимальным количеством слоев и имеют название латеральная инверсия. Позднее И. Океном разработаны подходы, позволяющие создавать псевдо-2D модели, в которых изменения удельного сопротивления являются плавными. Для обеспечения латеральной выдержанности квазигоризонтально-слоистой среды задаются ограничения при помощи ковариационной матрицы шероховатости, построенной на основе априорной информации. Данный подход получил название латеральной закрепленной инверсии (англ.: lateral constrained inversion, LCI) [13]. Для инверсии данных ЗСБ, при решении нефтегазопроисловых задач, применяется подход, схожий с латеральной закрепленной 1D инверсией, который основан не на данных бурения скважин, а на стабилизации задачи за счет учета УЭС в слое на соседних точках ЗСБ или на пространственном накоплении [6, 7]. Подход представляет собой разновидность латеральной закрепленной инверсии, не требующей жесткого закрепления результата решения обратной задачи в соответствии с априорной информацией. Методология получила широкое распространение при интерпретации данных ЗСБ, выполненных по площадной сети наблюдений.

Закрепленная и незакрепленная инверсия данных ЗСБ в сложных структурно-тектонических условиях

При изучении регионального строения разреза перед электроразведкой стоит задача определения положения кровли фундамента, построения геоэлектрической модели осадочного чехла. Анализ наблюдаемых геофизических данных начинается с качественной интерпретации, которая позволяет предварительно оценить геоэлектрическую характеристику и основные особенности разреза осадочного чехла и поверхности фундамента (Рис. 1, а).

Для достижения оптимального результата, соответствующего априорной информации, инверсия выполняется в несколько циклов, каждый из которых объединяет в себе совокупность настроек (граф) инверсии: от параметров расчета прямой задачи, учета параметров регистрации до алгоритма оптимизации и вводимой регуляризации при решении обратной задачи. Настройки графа инверсии задаются в зависимости от задач, поставленных перед методом ЗСБ.

При незакрепленной (независимой) инверсии строится структурная модель, которая формируется как горизонтально-слоистая модель с геометрическим шагом по мощности, увеличивающимся с глубиной. В данном случае инверсия представляет собой своего рода независимую поточечную инверсию, которая проводится отдельно для каждой приемной петли (экспресс-инверсия). Для экспресс-инверсии используется программное обеспечение TEM-Processing [11], предназначенное для углубленной обработки данных ЗСБ, полученных аппаратурой семейства SGS и FastSnap [10, 11] и выполнения автоматической 1D инверсии. Алгоритм 1D-инверсии, встроенный в ПО TEM-Processing направлен на экспрессное (без значительных затрат времени) получение стартовой модели и достижение минимально возможного среднеквадратического расхождения (2-3%). Начальное приближение модели формируется путем анализа дифференциальной трансформанты сигнала ЭДС (кривой кажущейся проводимости $StHt$), далее итеративно происходит уточнение параметров модели (удельного сопротивления и/или мощностей слоев) до достижения требуемой невязки. Применение независимой экспресс-инверсии позволяет быстро получить геоэлектрическую модель осадочного чехла территории (Рис. 1, б).

В процессе интерпретации важно учитывать осложняющие эффекты, проявляющиеся на кривых ЗСБ. На территории НБА и севернее отмечается влияние эффекта индукционно-вызванной поляризации (ВПИ). Инверсия кривых ЗСБ с учетом параметров модели Cole-Cole выполнена с помощью программы Model 5, в которой используется алгоритм, разработанный сотрудниками института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН (г. Новосибирск) (Е.Ю. Антонов,

В.С.Могилатов, М.И. Эпов и др.). Автоматизация процесса подбора ВПИ происходит за счет построения выдержанной по латерали модели УЭС в слое и минимизации невязки путем определения параметров поляризации формулы Cole-Cole.

Немаловажным фактором при решении нефтегазопоисковых задач является учет результатов предшествующих сейсморазведочных работ, поэтому перед инверсией формируется опорная модель и структурная основа по данным МОГТ (структурный каркас). Стартовая модель, представляет собой основу в виде слоев с определенными по данным МОГТ мощностями и удельными электрическими сопротивлениями, полученными на этапе экспресс-инверсии. Путем пересчета на новую структурную основу (мощности слоев по МОГТ) через проводимость формируется модель удельных электрических сопротивлений для каждой кривой зондирования. Далее проводится латеральная закрепленная инверсия. Завершающие циклы закрепленной в рамках структурного каркаса инверсии позволяют достичь оптимальных значений невязок и получить выдержанный по латерали разрез, согласованный с априорной информацией, решить задачу картирования перспективных в нефтегазоносном отношении участков (Рис.1, в).

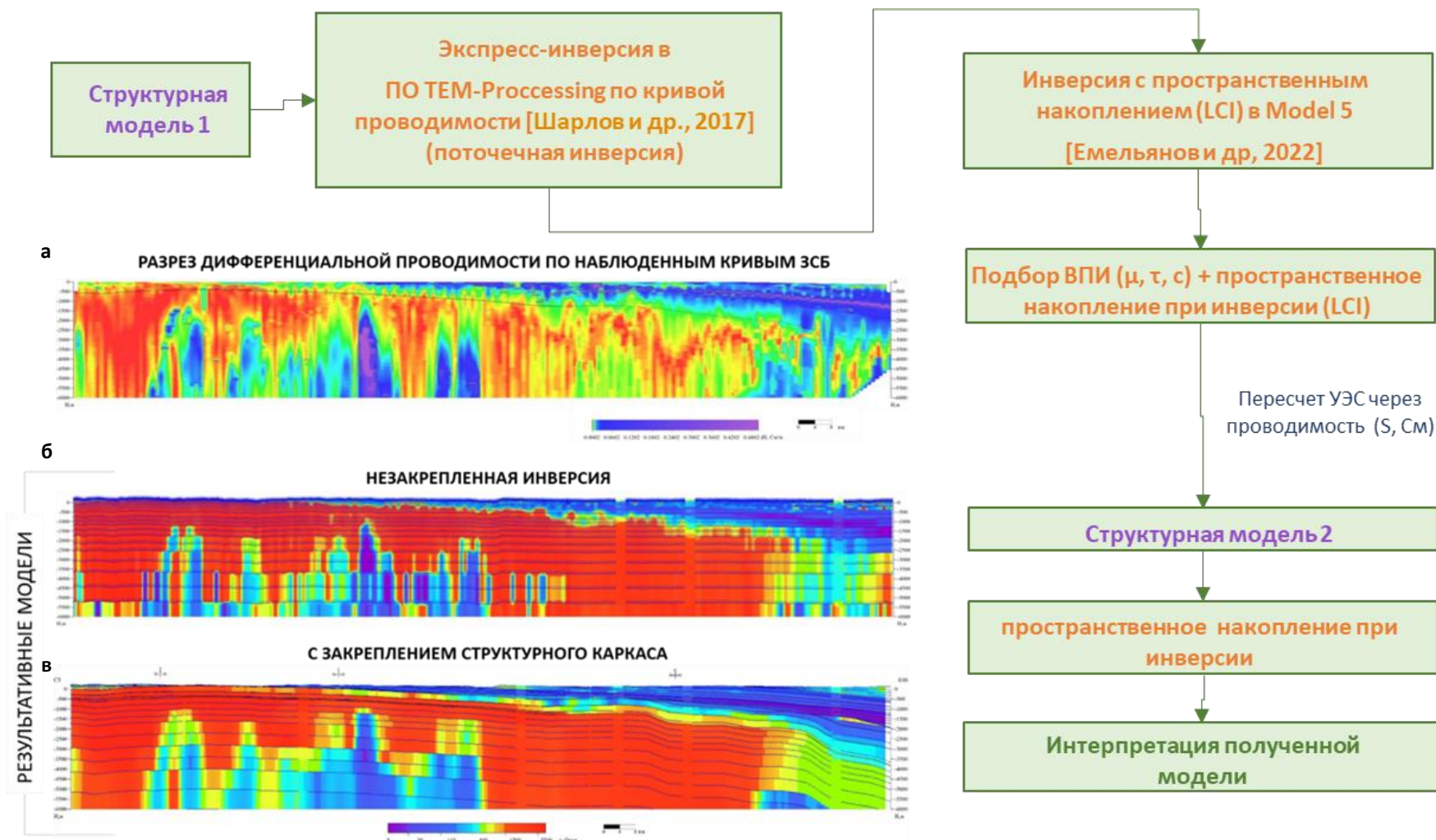


Рисунок 1. Блок схема инверсии данных ЗСБ: а – результат качественной интерпретации (удельная проводимость); б – результат незакрепленной инверсии; в – результат закрепленной латеральной инверсии в структурном каркасе по данным МОГТ

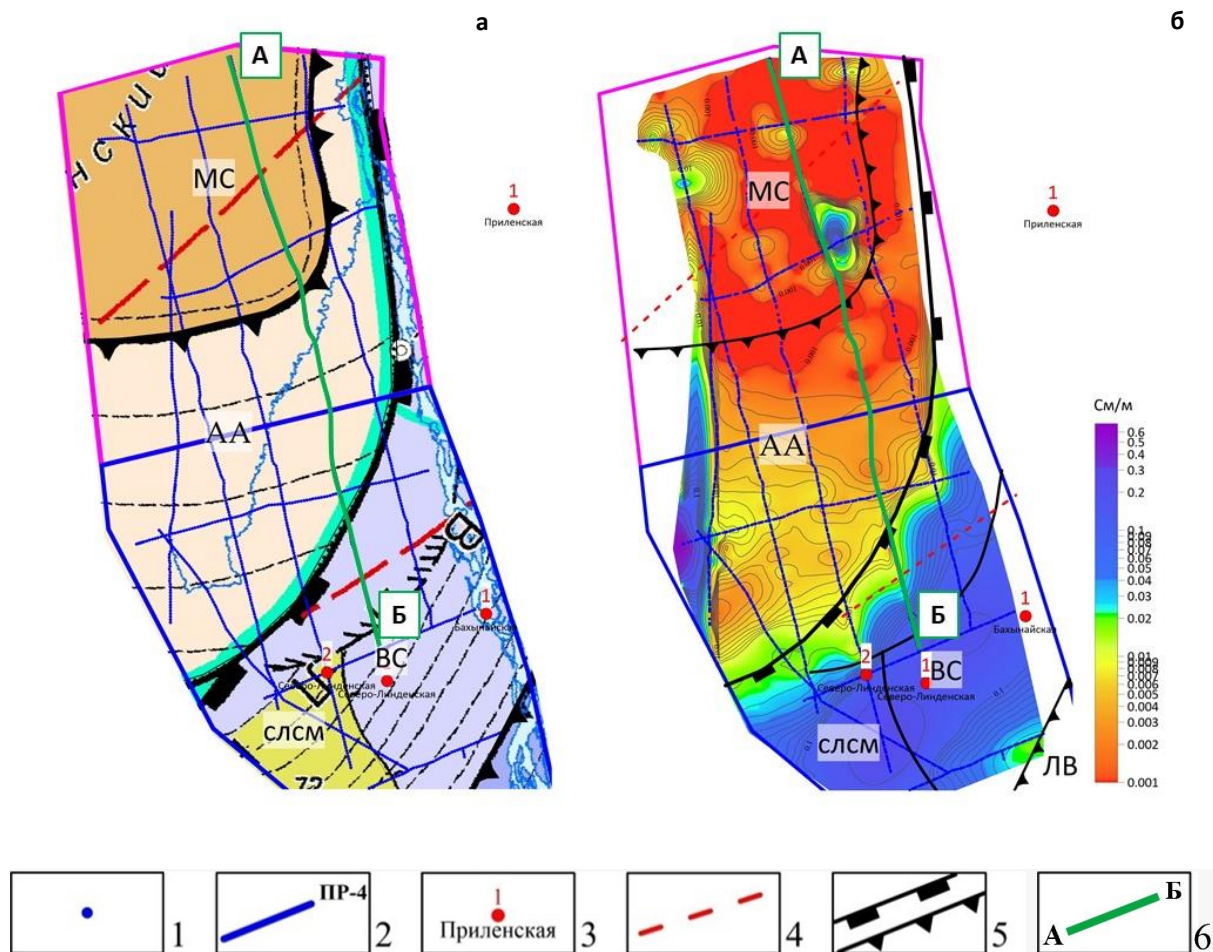
Результаты

Результат применения рассмотренных подходов интерпретации показан на примере участка, расположенного в Жиганском районе Республики Саха (Якутия). Территория исследований входит в состав Лено-Тунгусской нефтегазоносной провинции (НГП) на границе Анабарской, Западно-Вилюйской и Вилюйской нефтегазоносных областей (НГО). В тектоническом отношении территория относится к району Мунского свода, Анабарской антеклизы, Вилюйской синеклизы.

Полевые работы методом ЗСБ проводились с использованием цифровой телеметрической электроразведочной станции нового поколения SGS–ТЕМ Пикет–32 [11]. Длина стороны генераторной петли составляла 600 м, приемной – 18 м. Шаг приемников по профилю составлял 500 м. При производстве зондирований в генераторную петлю подавался ток силой не менее 190 А, что позволило получить надежную информацию о строении разреза до глубины около 8 км. При производстве работ ЗСБ для достижения необходимой глубинности регистрация сигнала происходила с разными периодами, которые увеличивались в зависимости от проводимости изучаемого разреза в процессе проведения работ ЗСБ.

Рассматривая результаты электроразведочных исследований, уже на этапе качественной интерпретации можно видеть общие черты регионального тектонического и геологического строения территории исследования. Суммарная проводимость разреза изменяется в широком диапазоне от нескольких сименс до нескольких сотен сименс. Уменьшение значения суммарной проводимости характерно для южного склона Анабарской антеклизы и Мунского свода ввиду сокращения толщины осадочной толщи (Рис. 2, б). Повышением суммарной проводимости разреза до 100 См и более характеризуется Вилюйская синеклиза и Северо-Линденский структурный мыс южной части территории, в связи с увеличением мощности палеозойско-мезозойского осадочного комплекса.

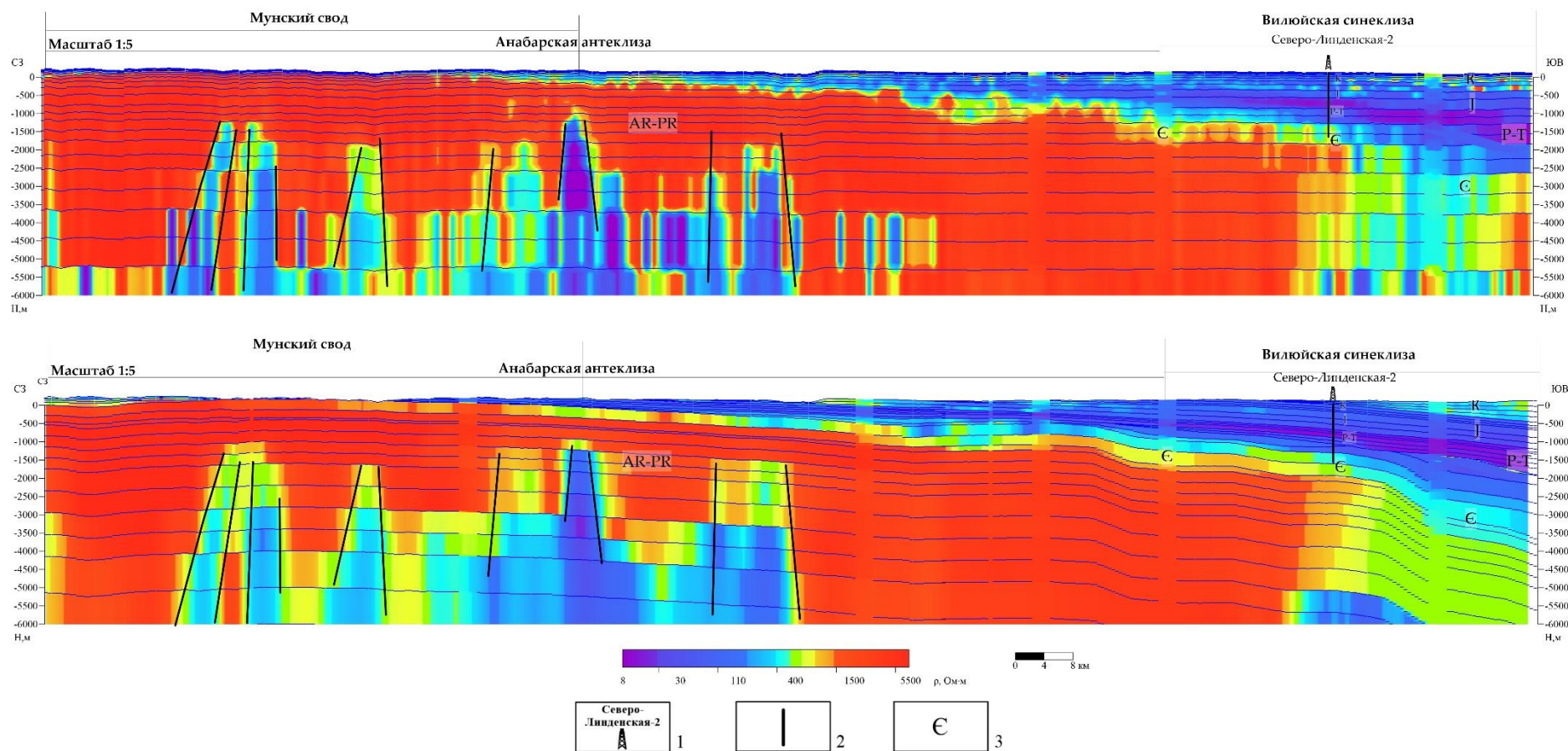
В геоэлектрическом разрезе по данным ЗСБ выделено 6 основных комплексов (Рис. 3, а, б): меловой, юрский, триасовый, пермский, кембрийский и вендский, а также породы кристаллического фундамента.



Условные обозначения: 1 – пункты ЗСБ; 2 – линии профилей; 3 – скважины глубокого бурения; 4 – тектонические нарушения по данным МОГТ; 5 – изолинии тектонической карты нефтегазоносных провинций [Старосельцев (СНИИГИМС), 2018]; 6 – линия профиля А-Б. Расшифровка сокращений: МС – Мунский свод; АА – Анабарская антеклиз; ВС – Вилуйская синеклиза; СЛСМ – Северо-Линденский структурный мыс.

Рисунок 2. Сопоставление карт дифференциальной проводимости со структурным строением территории исследования: а – тектоническая карта по Старосельцеву, 2018 г [8]; б – карта удельной проводимости по данным ЗСБ.

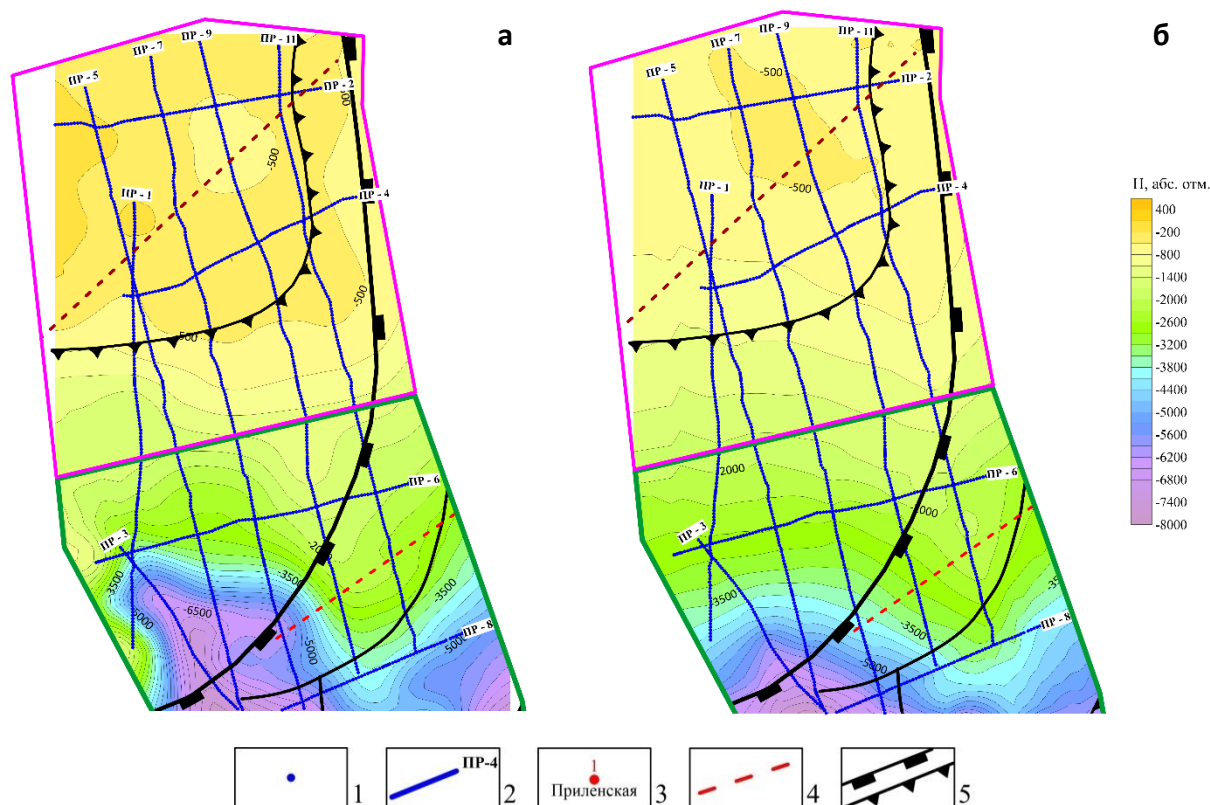
На геоэлектрических разрезах (Рис. 3, а, б) по данным ЗСБ, выделены тектонические нарушения, в частности, совпадающие с региональными тектоническими разломами, секущими площадь. Кристаллические породы фундамента по результатам работ ЗСБ отражаются в разрезе высокими значениями сопротивления 350 – 2000 Ом·м, на фоне которых зачастую отмечаются неоднородные объекты с низкими значениями сопротивления (менее 50 – 100 Ом·м).



Условные обозначения: 1 – скважина глубокого бурения; 2 – тектонические нарушения по данным ЗСБ; 3 – стратиграфические индексы.

Рисунок 3. Геоэлектрические разрезы по данным ЗСБ профиля А-В, полученные: а – по результатам поточечной инверсии в структурном каркасе с геометрическим шагом; б – результатам закрепленной латеральной инверсии в структурном каркасе по МОГТ.

По результатам незакрепленной инверсии данных ЗСБ было выполнено картирование положения предполагаемой кровли фундамента и построена карта абсолютных отметок кровли фундамента по ЗСБ (Рис. 4, а). В северной части участка исследований наблюдается значительное поднятие кристаллического фундамента до отметки а.о. –500м (характеризующегося высокими УЭС), а мощность осадочного чехла составляет 300...–500 м, что соответствует результатам интерпретации МОГТ (Рис. 4, б). В направлении к Вилюйской синеклизе кровля фундамента погружается до отметок –5000...–7500 м и глубже.



Условные обозначения: 1 – пункты ЗСБ; 2 – линии профилей; 3 – скважины глубокого бурения; 4 – тектонические нарушения по данным МОГТ; 5 – изолинии тектонической карты нефтегазоносных провинций [Старосельцев (СНИИГИМС), 2018]; 6 – линия профиля А-Б. Расшифровка сокращений: МС – Мунский свод; АА – Анабарская антеклиз; ВС – Вилюйская синеклиза; СЛСМ – Северо-Линденский структурный мыс.

Рисунок 4. а – карта положения кровли фундамента по данным ЗСБ; б – карта положения кровли фундамента по данным МОГТ.

По результатам закрепленной инверсии построена комплексная модель по ЗСБ, совмещенная с данными МОГТ, которая позволяет дополнить данные МОГТ о прогнозе насыщения основных горизонтов коллекторов.

Выводы

Так, по электроразведочным данным ЗСБ предварительно выделяются основные геологические структуры Мунского свода, Анабарской антеклизы, Вилюйской синеклизы: наблюдается понижение абсолютных отметок в направлении с северо-запада на юго-восток, что подтверждает поднятие фундамента в северной части района исследований; полученная по данным ЗСБ модель согласуется с тектонической картой по Старосельцеву 2018 г и данными МОГТ.

Применение методики интерпретации, представляющей собой комбинированный подход закрепленной и незакрепленной инверсии данных ЗСБ, позволило получить новую информацию о малоизученных территориях Сибирской платформы и решить поставленные перед методом ЗСБ геологические задачи.

Список литературы

Опубликованная литература

1. Антонов Е.Ю., Кожевников Н.О., Компаниец С.В. Проявление и учет индукционно-вызванной поляризации при изучении осадочного чехла юга Сибирской платформы методом ЗСБ. // Геофизика, 2013, №2. С. 35–40.
2. Буддо И.В., Смирнов А.С., Мисюркеева Н.В., Шелохов И.А., Поспеев А.В., Касьянов В.В. [и др.]. Интегрирование данных электромагнитных и сейморазведочных исследований на всех стадиях геологоразведочных работ: от поисково-оценочного этапа до разработки месторождения углеводородов // Экспозиция нефть газ. 2018. № 6. С. 24–28.
3. Буддо И.В. Тонкослоистые модели при изучении коллекторов в осадочном чехле методом зондирования становлением поля в ближней зоне – методика и результаты интерпретации (на примере юга Сибирской платформы): автореф. дис. канд. геол.-минерал. наук: 25.00.10. Иркутск, 2012. 16 с.
4. Емельянов, В.С., Кердан А.В., Мурзина Е.В., Шелохов И.А., Свидетельство о регистрации программы ЭВМ № 2023663275 Model 5, 2023.
5. Жданов М.С. Теория решения обратных задач и регуляризации в геофизике / пер. с англ.; под ред. И.М. Варенцова. М.: Научный мир, 2007. 710 с.
6. Мурзина Е. В., Поспеев А. В., Семинский И. К., Буддо И. В., Немцева Д. Б., Емельянов В. С., Агафонов Ю. А. Особенности инверсии данных

- высокоплотных электромагнитных зондирований при нефтегазопроисловых исследованиях на территории Непско-Ботуобинской антеклизы // Науки о Земле и недропользование. 2022. а.Т. 45. № 2. С. 137–151. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-2-137-151>.
7. Мурзина Е.В. Оценка качества инверсии кривых нестационарных электромагнитных зондирований при решении нефтегазопроисловых задач: автореф. дисс. канд. геол.-минерал. наук: 25.00.10. Иркутск, 2022 б. 20 с.
8. Тектоническая карта нефтегазонасных провинций Сибирской платформы / ред. В. С. Старосельцев. – Новосибирск : СНИИГГиМС, 2018.
9. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач: учеб. пособие для вузов. М.: Наука, 1986. 286 с.
10. Шарлов М.В., Агафонов Ю.А., Стефаненко С.М. Современные телеметрические электроразведочные станции SGS-TEM и FastSnap. Эффективность и опыт использования // Приборы и системы разведочной геофизики. 2010. Т. 31. № 1. С. 20–24.
11. Шарлов М.В. Интегрированная система обработки и инверсии данных нестационарных электромагнитных зондирований // Приборы и системы разведочной геофизики. 2017. Т. 60. № 2. С. 24–35.
12. Эпов М.И., Ельцов И.Н. Прямые и обратные задачи индуктивной геоэлектрики в одномерных средах. Новосибирск: Изд-во ОИГГМ, 1992. 31 с.
13. Auken E., Foged N., and Sørensen K. I., Model recognition by 1-D laterally constrained inversion of resistivity data // 9th Meeting, Environmental and Engineering Geophysical Society—European Section, 2002. P. 241–244. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201406195>.
14. Loke M.H., Barker R.D. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method // Geophysical Prospecting. 1996. Vol. 44. Iss. 1. P. 131–152. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.1996.tb00142.x>.
15. Oldenburg D.W., Li Y., Aki K., Richards P.G., Alumbaugh D., Newman G., et al. Inversion for applied geophysics: a tutorial // Investigations in Geophysics. 2005. P. 89–150. <https://doi.org/10.1190/1.9781560801719.ch5>.

16. Pelton, W.H. Mineral discrimination and removal of inductive coupling with multifrequency IP / W.H. Pelton, S.H. Ward, P.G. Hallof, W.R.Sill, P.H. Nelso. // Geophysics. — 1978.— 43 — r.588—609.
17. Wisén, R., Auken, E., & Dahlin, T. Combination of ID laterally constrained inversion and smooth inversion of resistivity data with a priori data from boreholes. Near Surface Geophysics, 3(2); 2005. pp. 71–78.

References

1. Antonov E.Yu., Kozhevnikov N.O., Kompaniecz S.V. Proyavlenie i uchet indukcionno-vy`zvannoj polarizacii pri izuchenii osadochnogo chexla yuga Sibirskoj platformy` metodom ZSB. // Geofizika, 2013, №2. S. 35–40.
2. Buddo I.V., Smirnov A.S., Misyurkeeva N.V., Sheloxov I.A., Pospeev A.V., Kas`yanov V.V. [i dr.]. Integrirovaniye danny`x e`lektromagnitny`x i sejsmorazvedochny`x issledovaniy na vsekh stadiyax geologorazvedochny`x rabot: ot poiskovo-ocenochnogo e`tapa do razrabotki mestorozhdeniya uglevodorodov // E`kspozitsiya neft` gaz. 2018. № 6. S. 24–28.
3. Buddo I.V. Tonkosloisty`e modeli pri izuchenii kollektorov v osadochnom chexle metodom zondirovaniy stanovleniem polya v blizhnej zone – metodika i rezul`taty` interpretacii (na primere yuga Sibirskoj platformy`): avtoref. dis. kand. geol.-mineral. nauk: 25.00.10. Irkutsk, 2012. 16 s.
4. Emel`yanov, V.S., Kerdan A.V., Murzina E.V., Sheloxov I.A., Svidetel`stvo o registracii programmy` E`VM № 2023663275 Model 5, 2023.
5. Zhdanov M.S. Teoriya resheniya obratny`x zadach i regulyarizacii v geofizike / per. s angl.; pod red. I.M. Varenchova. M.: Nauchny`j mir, 2007. 710 s.
6. Murzina E. V., Pospeev A. V., Seminskij I. K., Buddo I. V., Nemceva D. B., Emel`yanov V. S., Agafonov Yu. A. Osobennosti inversii danny`x vy`sokoplotny`x e`lektromagnitny`x zondirovaniy pri neftegazoposkovy`x issledovaniyax na territorii Nepsko-Botuobinskoj anteklizy` // Nauki o Zemle i nedropol`zovanie. 2022. a.T. 45. № 2. S. 137–151. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-2-137-151>.
7. Murzina E.V. Ocenka kachestva inversii krivy`x nestacionarny`x e`lektromagnitny`x zondirovaniy pri reshenii neftegazoposkovy`x zadach: avtoref. diss. kand. geol.-mineral. nauk: 25.00.10. Irkutsk, 2022 b. 20 s.
8. Tektonicheskaya karta neftegazonosny`x provincij Sibirskoj platformy` / red. V. S. Starosel`cev. – Novosibirsk: SNIIGGiMS, 2018.

9. Tixonov A.N., Arsenin V.Ya. Metody` resheniya nekorrektny`x zadach: ucheb. posobie dlya vuzov. M.: Nauka, 1986. 286 c.
10. Sharlov M.V., Agafonov Yu.A., Stefanenko S.M. Sovremennyye telemetricheskie e`lektrozvedochny`e stancii SGS-TEM i FastSnap. E`ffektivnost` i opy`t ispol`zovaniya // Pribory` i sistemy` razvedochnoj geofiziki. 2010. T. 31. № 1. S. 20–24.
11. Sharlov M.V. Integrirovannaya sistema obrabotki i inversii danny`x nestacionarny`x e`lektromagnitny`x zondirovanij // Pribory` i sistemy` razvedochnoj geofiziki. 2017. T. 60. № 2. S. 24–35.
12. E`pov M.I., El`czov I.N. Pryamy`e i obratny`e zadachi induktivnoj geoe`lektriki v odnomerny`x sredax. Novosibirsk: Izd-vo OIGGM, 1992. 31 s.
13. Auken E., Foged N., and Sørensen K. I., Model recognition by 1-D laterally constrained inversion of resistivity data // 9th Meeting, Environmental and Engineering Geophysical Society—European Section, 2002. P. 241–244. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201406195>.
14. Loke M.H., Barker R.D. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method // Geophysical Prospecting. 1996. Vol. 44. Iss. 1. P. 131–152. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.1996.tb00142.x>.
15. Oldenburg D.W., Li Y., Aki K., Richards P.G., Alumbaugh D., Newman G., et al. Inversion for applied geophysics: a tutorial // Investigations in Geophysics. 2005. P. 89–150. <https://doi.org/10.1190/1.9781560801719.ch5>.
16. Pelton, W.H. Mineral discrimination and removal of inductive coupling with multifrequency IP / W.H. Pelton, S.H. Ward, P.G. Hallof, W.R.Sill, P.H. Nelso. // Geophysics. — 1978.— 43 — r.588—609.
17. Wisén, R., Auken, E., & Dahlin, T. Combination of 1D laterally constrained inversion and smooth inversion of resistivity data with a priori data from boreholes. Near Surface Geophysics, 3(2); 2005. pp. 71–78.