



141540, Московская обл.,  
Солнечногорский район, пгт Поварово,  
ул. Юбилейная, д. 21.  
Тел.: +7 (499) 344-04-24.  
E-mail: info@geotechnologies-rus.com  
www.geotechnologies-rus.com

# Аэроэлектроразведка для решения инженерных и рудных задач

**Д.И. Богатырев** — инженер ИПУ РАН  
**Е.В. Каршаков** — заведующий лабораторией динамических информационно-управляющих систем ИПУ РАН, д.т.н.  
**В.М. Керцман** — преподаватель кафедры геофизических методов исследования земной коры МГУ им. М.В. Ломоносова  
**Е.В. Мойланен** — научный сотрудник ИПУ РАН  
**Ю.Г. Подмогов** — главный геофизик «Геотехнологии»

## Введение

Проблема повышения эффективности поисков рудных месторождений, как в пределах известных рудных районов, так и на новых перспективных площадях весьма актуальна. Важную роль при этом играют аэроэлектроразведочные методы, отличительной особенностью которых являются высокая мобильность и производительность, возможность опосредованного изучения больших территорий [3, 4, 6, 7]. Мы покажем, как использование современных аэроэлектроразведочных технологий вместе с традиционными наземными исследованиями позволяет резко повысить эффективность поисков рудных месторождений.

## Отличительные особенности современной аэроэлектроразведки

Основные технические особенности аэроэлектроразведочной системы ЭКВАТОР заключаются в возможности одновременно выполнять зондирования во временной и частотной областях. При измерениях контролируется реальная форма импульса и геометрия измерительной установки. Это позволяет выполнять кондиционные измерения удельных сопротивлений среды в диапазоне 0,1–15000 Ом·м в интервале глубин 0–400 м. Важной особенностью комплекса является его высокая производительность и возможность кондиционных измерений в горной местности.

*Рассматриваются технические особенности электромагнитной системы комплекса ЭКВАТОР, которые позволяют с хорошей точностью выполнить оценку удельных сопротивлений в диапазоне от первых долей до нескольких тысяч Ом·м. Приводятся примеры решений гидрогеологических задач в прибрежно-морской зоне в Хорватии в 2021 г. и на нефтегазоконденсатном месторождении в Якутии, приводятся убедительные результаты измерений при поисково-съёмочных работах на золоторудных участках Восточной Сибири в 2019–2020 гг. и на Камчатке в 2021 г. Очень важно, что многие результаты получены в условиях промышленных помех и сложного рельефа местности.*

**Ключевые слова:** аэрогеофизика, комплекс ЭКВАТОР, электроразведка, удельные сопротивления, золото.

## Практические результаты работ Поиски воды в условиях многолетнемерзлых пород (Якутия)

Интенсивное строительство протяженных линейных сооружений, ведущееся в последнее время в России, требует организации локальных водозаборов преимущественно для технического водоснабжения. Строительство выполняется в тундре и тайге, где отсутствует транспортная сеть, кроме просек. В этих регионах широко развиты многолетнемерзлые породы с мощностью до 300–350 м. Сроки выполнения исследовательских работ обычно невелики, составляя несколько рабочих недель.

Как из физических предпосылок, так и из опыта работ в этих условиях очевидно, что наиболее пригодным методом для выделения участков, пер-

спективных для бурения на воду, является электроразведка методом переходных процессов (МПП). Нами выполнен совместный анализ всех полученных данных. В условиях многолетнемерзлых пород развит эффект индуктивно-вызванной поляризации [2]. Геоэлектрические разрезы, составленные по данным наземных работ и аэроаэро, хорошо совпадают, что говорит, как об устойчивости принятой геоэлектрической схематизации, так и об удовлетворительном расчленении разреза по удельному сопротивлению. Пример сопоставления разрезов по близко расположенным аэро и наземным профилям (расхождение в плане до 2000 м) приведен на рисунке 1.

Последующее бурение дало обильные водотоки, в пределах выделенных сквозных вертикальных зон, где нарушается прослеживание субгоризонтальных геоэлектрических границ. ▶

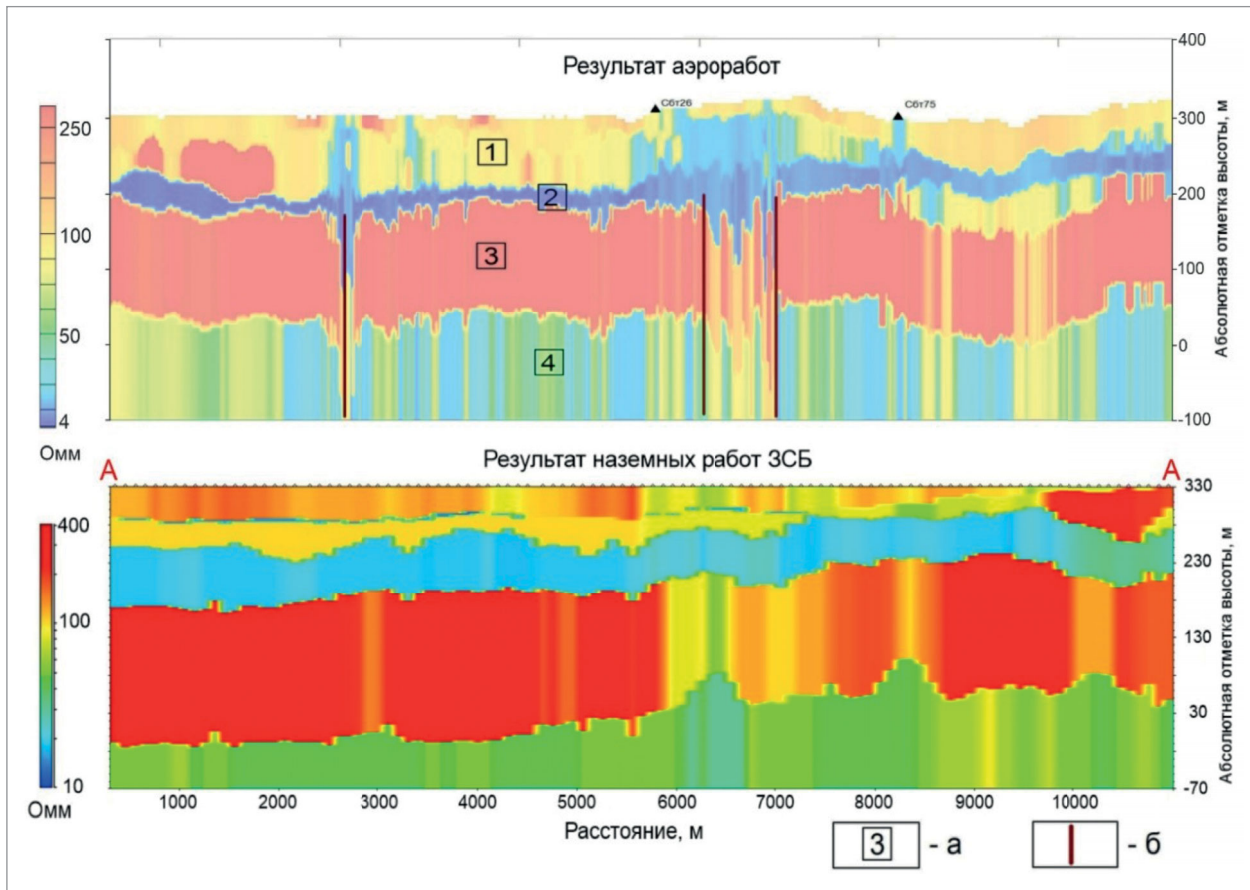


Рис. 1. Сопоставление результатов аэроработ с аппаратурой ЭКВАТОР по маршруту 1 и наземных работ ЗСБ [1] с выделением аномальных зон в метеоро-ичерском горизонте  
*а — номер геоэлектрического горизонта, б — зоны, перспективные для бурения на воду*

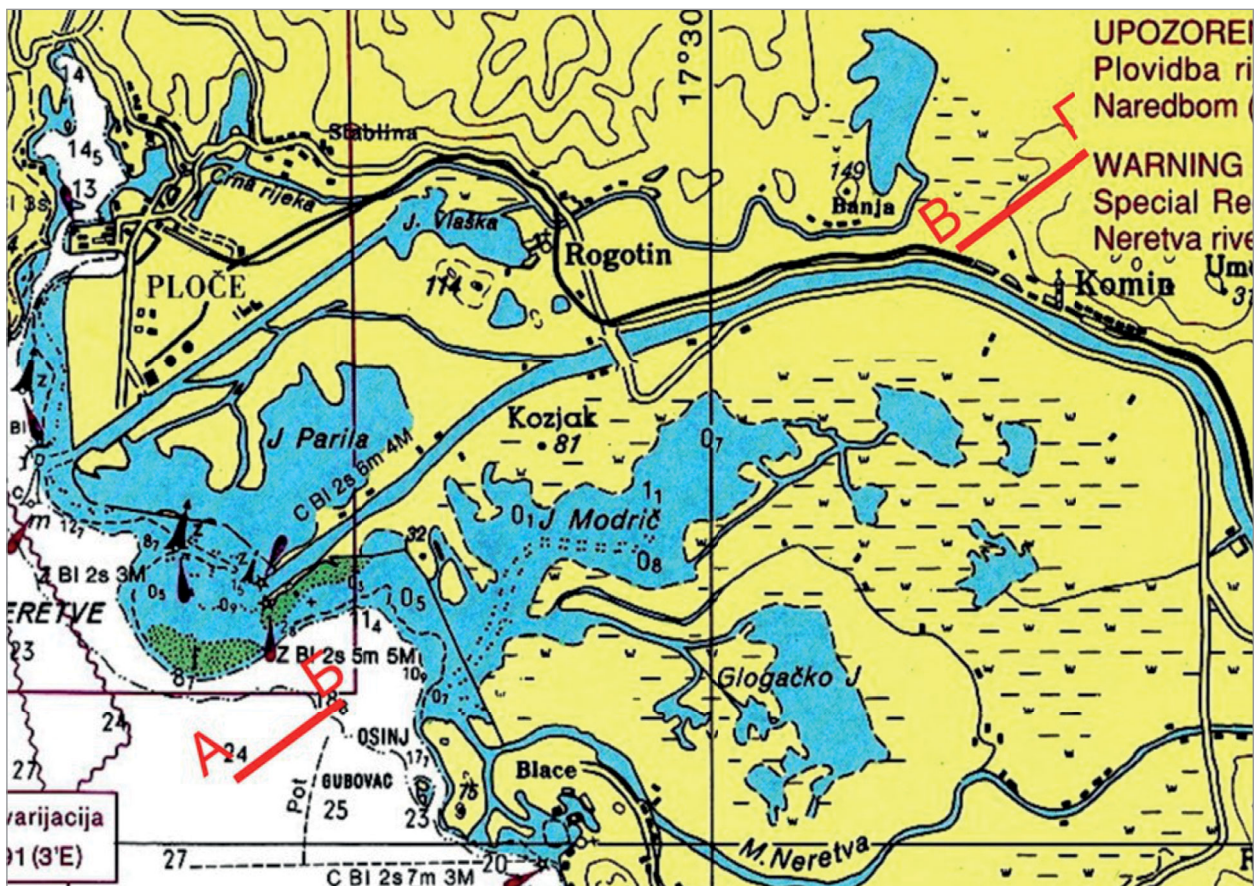


Рис. 2. Картографическая схема с указанием абсолютных высот и глубин, красным выделены линии геоэлектрических разрезов



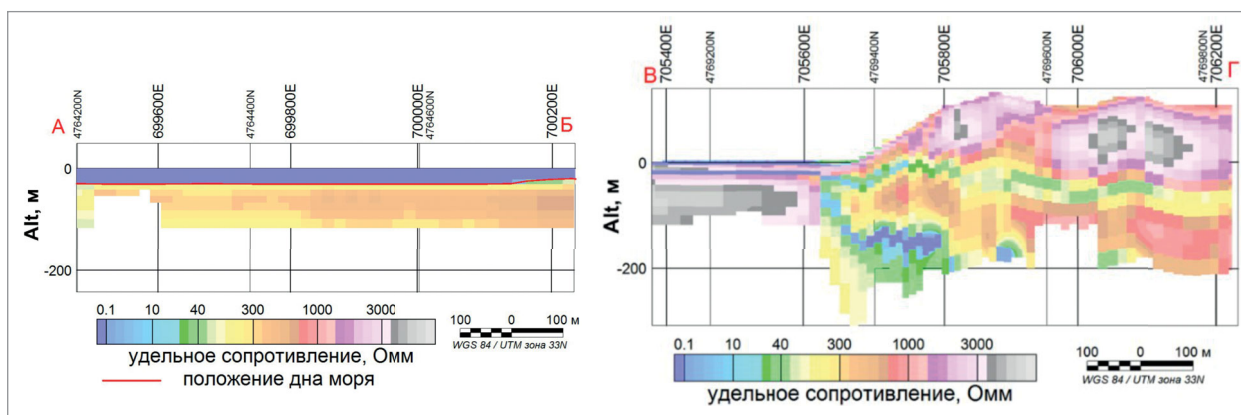


Рис. 3. Геоэлектрические разрезы морской (линия АБ, слева) и горной (линия ВГ, справа) частей, построенные по результатам одномерной инверсии данных

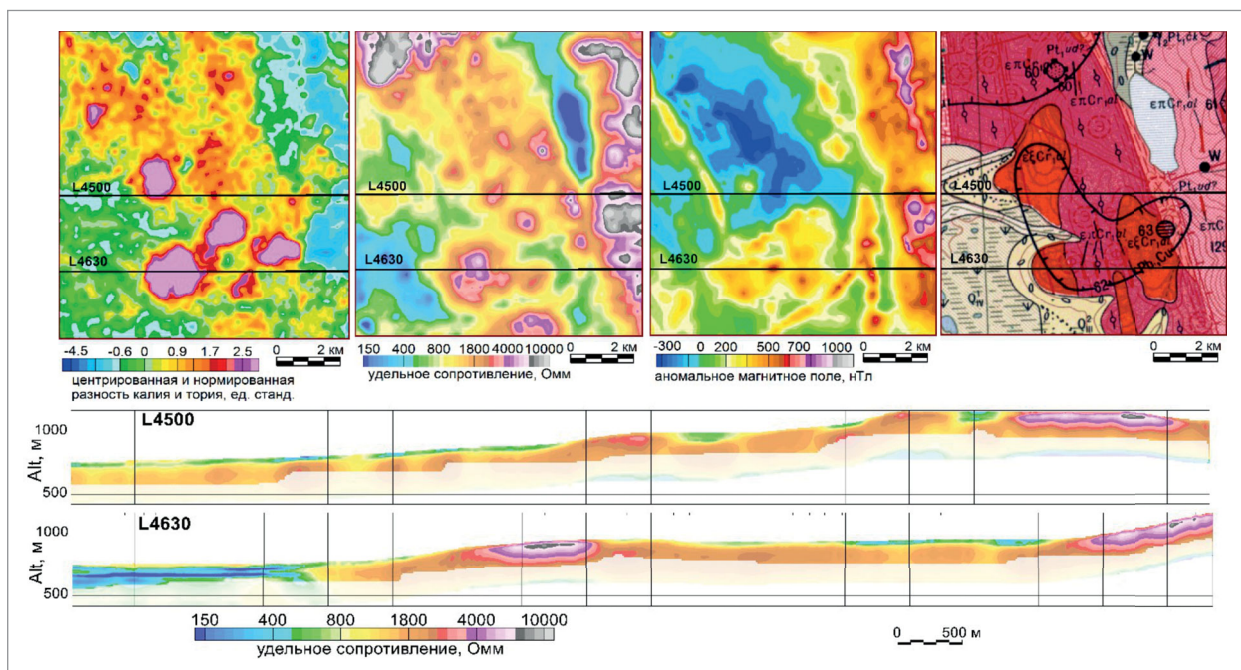


Рис. 4. Восточная Сибирь. Выделение рудоперспективных участков по комплексу признаков. Вверху слева направо: центрированная и нормированная разность калия и тория; поле кажущихся сопротивлений; аномальное магнитное поле; геологическая карта. Внизу — геоэлектрические разрезы по результатам 1D инверсии [5]. Бледным цветом показаны области с низкой достоверностью решения обратной задачи.

В частности, на отметке 6500 м (рис. 1, с. 89) была пробурена скважина в зоне с выраженными вертикальными нарушениями одномерной структуры ( $УЭС < 40 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ) в толще горизонта с  $УЭС = 120\text{--}250$ , соответствующего терригенно-карбонатным породам метасерпентинитовой свиты ( $\text{Є1-2mt-ic}$ ). По результатам обследования в ней было выделено четыре интервала мощностью по 3–6 м с водопритоком соленых вод. При откачке с дебитом 3 л/с понижение уровня в скважине составило всего 14 м. Для сравнения в скважинах вне аномальной зоны при дебите 1–2 л/с понижение уровня составило 96–115 м.

### Республика Хорватия

В 2021 г. была произведена аэроэлектроразведочная съемка в Хорватии. Целью работ было получить гидрогеологическую модель дельты реки

Неретва. На основе данной модели разрабатывается стратегия борьбы с поступлением соленой морской воды в имеющиеся источники пресных грунтовых вод. Измерения выполнялись над акваторией Адриатического моря и в пределах речной долины, абсолютные отметки которой на 2 м ниже уровня моря (отгорожена дамбой), а также в прибрежных горах, где обнажаются породы скального основания. На площади работ присутствовали многочисленные источники промышленных помех (электрифицированная железная дорога, ЛЭП). На рисунках 2 (с. 89) и 3 приводятся схема высот и геоэлектрические разрезы по результатам 1D инверсии электромагнитных данных [5]. Измеренные значения удельных сопротивлений составляют: для морской воды — 0,2–0,3 Ом·м, для донных отложений — 1–3 Ом·м, для коренных пород — 100–400 Ом·м, для отложений

речной долины — 0,5–60 Ом·м, для скальных пород характерны сопротивления 1000–4000 Ом·м. С помощью аэроэлектроразведки удалось определить электропроводность донных отложений в заливе с отметками глубин порядка 30 м.

### Район золоторудного месторождения Таборное (Восточная Сибирь)

По результатам съемки масштаба 1:20000 демонстрируются возможности локализации рудоперспективных участков с петрофизическими характеристиками близкими к эталонным участкам (рис. 4). Также показаны случаи, когда выделяются золотоперспективные области другой природы с другими физическими характеристиками, в частности связанные с раннемеловыми сиенитами среди пород архейского либо нижнепротерозойского возраста (рис. 4).

## Камчатка

В 2021 г. выполнялись аэрогеофизические работы на нескольких участках Камчатского полуострова, с целью оценки их перспектив на обнаружение гидротермальных золоторудных месторождений типа «хай сульфидэйшн» [8]. По одному из таких участков приводятся результаты исследований (рис. 5 и 6).

К перспективным участкам, связанным со вторичными кварцитами, отнесены области развития высокоомных, низко-радиоактивных и немагнитных пород.

По геофизическим данным, детально оконтурированы области возможного присутствия вторичных кварцитов и окружающих низкоомных пород, которые рассматриваются как первоочередные, для оценки золотоносности.

Выявлены контуры слепых магнитных интрузий, которые являются возможным источником гидротерм для формирования вторичных кварцитов в верхней части разреза. Эти интрузии потенциально перспективны для обнаружения Cu-Au месторождений порфирирового типа.

## Выводы

Аэроэлектроразведка с аппаратурой ЭКВАТОР обеспечивает получение информации о геоэлектрическом разрезе до глубины 400 м. В условиях реальной съемки удалось измерить удельные сопротивления от 0,1 до 10000 Ом·м. С использованием высокоманевренного вертолета Eurocopter удалось получить кондиционные измерения при градиенте рельефа до 600 м/км и изменении скорости вертолета от 0 до 200 км/ч.

Поисковые рудные и инженерно-геологические задачи определяются масштабом съемки от 1:5000 до 1:50000. Чаще всего съемка выполняется в комплексе с магнитометрией и гамма спектрометрией. ♦



1. Агеев В.В., Агеев Д.В. Изучение мерзлых разрезов Якутии с помощью методов ЗСБ и ВЗЗ-ВП. // «Инженерная геология». 2017 г., № 2, с. 64–69.
2. Каминский В.Ф., Viezzoli A., Fiandaca G., Гончаров Е.М. Эффект индуктивно вызванной поляризации в аэро-эм-данных: примеры из рудной и алмазной разведки // «Вопросы естествознания». 3(11), с. 88–92, 2016 г.
3. Chen T., Hodges G., Christensen A.N., Lemieux J. Multipulse Airborne TEM Technology and Test Results Over Oil-sands. 76<sup>th</sup> EAGE Conference and Exhibition, Amsterdam. 2014, 4, DOI: 10.3997/2214-4609.20140607.
4. Fountain D. Airborne electromagnetic systems — 50 years of development. Exploration Geophysics, 29, pp. 1–11, 1998.
5. Karshakov E. Iterated extended Kalman filter for airborne electromagnetic data inversion. Exploration Geophysics, 51(1): pp. 66–73, 2020. DOI: 10.1080/08123985.2019.1593790.
6. Legault J. Airborne Electromagnetic Systems — State of the Art and Future Directions. CSEG Recorder, 40(6), pp. 38–49, 2015.
7. Palacky G.J., West G.F. Airborne Electromagnetic Methods, Electromagnetic Methods in Applied Geophysics. Applications in M.N. Nabighian (Ed.), 2, pp. 811–880, 2008.
8. Pour A.B., Hashim, M. The application of ASTER remote sensing data to porphyry copper and epithermal gold deposits. Ore Geology Reviews, 44, pp. 1–9, 2012.

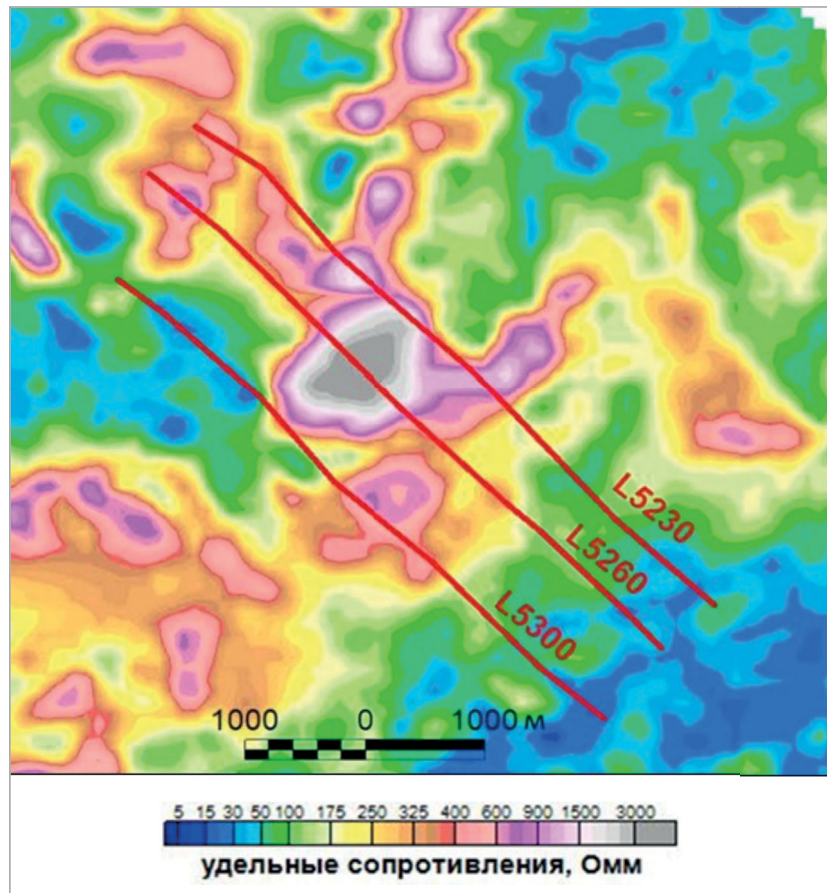


Рис. 5. Карта удельных сопротивлений для интервала глубин 0–50 м

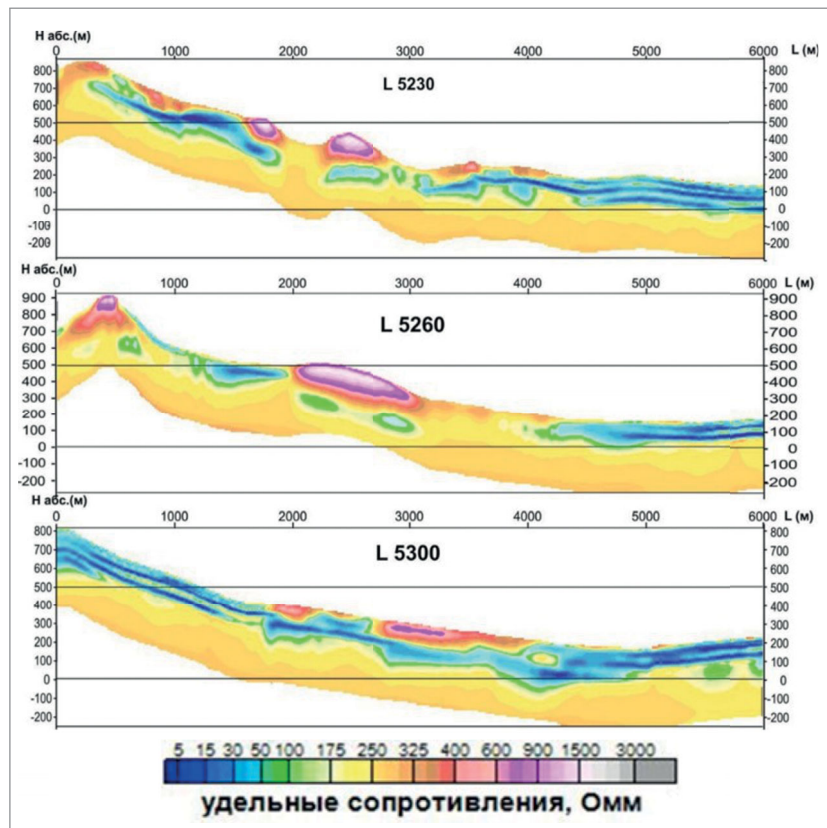


Рис. 6. Геоэлектрические разрезы по результатам одномерной инверсии данных, Камчатка