

# ПРИМЕНЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ АЭРОГЕОФИЗИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ДЕТАЛЬНЫХ ИНЖЕНЕРНО- ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИЗЫСКАНИЙ

## APPLICATION OF MODERN AIRBORNE GEOPHYSICAL TECHNOLOGIES FOR DETAILED ENGINEERING- GEOLOGICAL SURVEY



### ПОДМОГОВ Ю.Г.

Главный геофизик ЗАО «Геотехнологии», г. Москва, [gp@gtcomp.ru](mailto:gp@gtcomp.ru)

### КАРШАКОВ Е.В.

Старший научный сотрудник Института проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук (ИПУ РАН), к.ф.-м.н., г. Москва, [karsh@gtcomp.ru](mailto:karsh@gtcomp.ru)

### КЕРЦМАН В.М.

Научный сотрудник геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, [gp@gtcomp.ru](mailto:gp@gtcomp.ru)

### МОЙЛАНЕН Е.В.

Ведущий геофизик ЗАО «Геотехнологии», старший инженер Института проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук (ИПУ РАН), г. Москва, [moilanen@mail.ru](mailto:moilanen@mail.ru)

### PODMOGOV Yu.G.

Main geophysicist of the «Geotechnologies» JS, Moscow, [gp@gtcomp.ru](mailto:gp@gtcomp.ru)

### KARSHAKOV E.V.

Senior researcher of the Trapeznikov Institute of Control Sciences of the Russian Academy of Sciences (ICS RAS), PhD (candidate of science in Physics and Mathematics), Moscow, [karsh@gtcomp.ru](mailto:karsh@gtcomp.ru)

### KERTSMAN V.M.

Researcher of Lomonosov Moscow State University, Moscow, [gp@gtcomp.ru](mailto:gp@gtcomp.ru)

### MOILANEN E.V.

Leading geophysicist of the «Geotechnologies» JS, senior engineer of the Trapeznikov Institute of Control Sciences of the Russian Academy of Sciences (ICS RAS), Moscow, [moilanen@mail.ru](mailto:moilanen@mail.ru)

**Ключевые слова:** аэрогеофизические исследования; метод переходных процессов; магнитометрия; аэрогеофизический комплекс «Экватор».

**Аннотация:** в данной работе продемонстрированы возможности современной аэрогеофизики при решении задач инженерной геологии. Аэрогеофизика позволяет выполнять работы на больших территориях в короткие сроки и с детальностью, не уступающей наземным исследованиям как в плане, так и по глубине. В качестве примера приводятся результаты работ с аэрогеофизическим комплексом «Экватор», полученные в условиях платформенного чехла (Западная Якутия) и кристаллического щита (Западная Африка).

**Key words:** airborne geophysical survey; transient electromagnetics (TEM); magnetometrics; «Equator» airborne geophysical complex.

**Abstract:** possibilities of modern aerogeophysics for solving engineering-geological problems are shown. Airborne geophysics permits to carry out survey in large areas quickly and in detail not worse than ground survey does both in plan and in depth. As an example the results of works using the «Equator» aerogeophysical complex in the conditions of a platform mantle (Western Yakutia) and a crystalline shield (Western Africa) are presented.

Традиционно для решения задач инженерной геологии применяются детальные наземные геофизические работы. Однако они выполняются, как правило, в ограниченных объемах, так как сопряжены с большими затратами труда и времени, особенно в сложных ландшафтных и климатических условиях.

Весьма производительны аэрометоды, сопоставимые с наземными по информативности получаемых данных. Современный аэрогеофизический комплекс позволяет одновременно оценивать магнитные, электрические и при необходимости радиоактивные характеристики горных пород. Все точки геофизических измерений привязываются с погрешностью менее 1 м.

Высокоточная магнитометрия позволяет детально показать изменчивость магнитных характеристик верхней части разреза и выявить тектонические нарушения, зоны повышенной трещиноватости, фрагменты палеодолин, карстовые образования и другие неоднородности.

Аэроэлектроразведка одновременно реализует метод переходных процессов (МПП) и метод зондирования в частотной области. Это позволяет детально изучать распределение кажущегося сопротивления (удельного сопротивления эквивалентного полупространства) в диапазоне значений от 1 до 10 000 Ом·м в интервале глубин 0–300 м с пространственным разрешением порядка 20 м и в плане, и по глубине.

Более детально технические характеристики и устройство комплекса приведены в работе [1]. В статье [3] проводится детальное сопоставление аэроданных с данными наземных электроразведочных систем (аэрокомплекса «Экватор» производства ЗАО «Геотехнологии»; комплекса для измерений методом переходных процессов «Цикл-5», разработанного ООО НТФ «Эльта»; трехчастотной аппаратуры ДИП ЕМ34-3XL производства компании Geonics), применявшихся при поисках кимберлитовых тел. Чувствительность и разрешающая способность аэрокомплекса не уступают данным наземной съемки при заметно большей производительности и плотности наблюдений.

В работе [2] приводится пример комплексов наземного (с использованием аппаратуры TEM-FAST 48HPC производства компании AEMR) и вертолетного (с применением комплекса «Экватор») вариантов метода переходных процессов (МПП) при выделении

участков, перспективных для бурения на воду в сложных условиях широкого развития многолетнемерзлых пород (на примере Якутии). Авторы доклада [2] обращают внимание на трудности при выполнении наземных исследований в таежных условиях зимой и особенно летом. В вертолетном варианте МПП требуемый объем измерений (320 пог. км) при удалении от аэропорта базирования 160 км был выполнен за два дня. Геоэлектрические разрезы, составленные по данным наземных и аэрооблет хорошо совпали. В результате удалось выделить перспективные участки под бурение гидрогеологических скважин.

Пробуренная в зоне аномалии скважина дала устойчивый приток воды. Результаты заверки послужили основанием для продолжения аэрогеофизических работ на соседнем участке.

Детальные опытно-методические исследования масштаба 1:5 000 с использованием комплекса «Экватор» в Западной Якутии выполнялись с целью

определения поисковых возможностей этой аппаратуры. Однако полученные результаты могут быть успешно использованы для демонстрации решения широкого круга инженерно-геологических задач. Так, карта сопротивлений больше отвечает вещественному составу отложений, а не их возрасту и стратиграфическому индексу (рис. 2). Отмечается зависимость сопротивления пород от степени их глинистости, которая характерна как для карбонатных, так и для терригенных отложений. Сопротивление пород однородного литологического состава также будет зависеть от степени обводненности и солевого состава воды. В свою очередь, обводненность грунтов и сильная изменчивость их сопротивлений могут определяться их состоянием (мерзлым или талым), степенью трещиноватости (развитием тектонических или карстовых процессов). Примеры картирования подобных объектов приведены на рис. 3, 4. Не следует забывать и о том, что кажущееся сопротивление — это

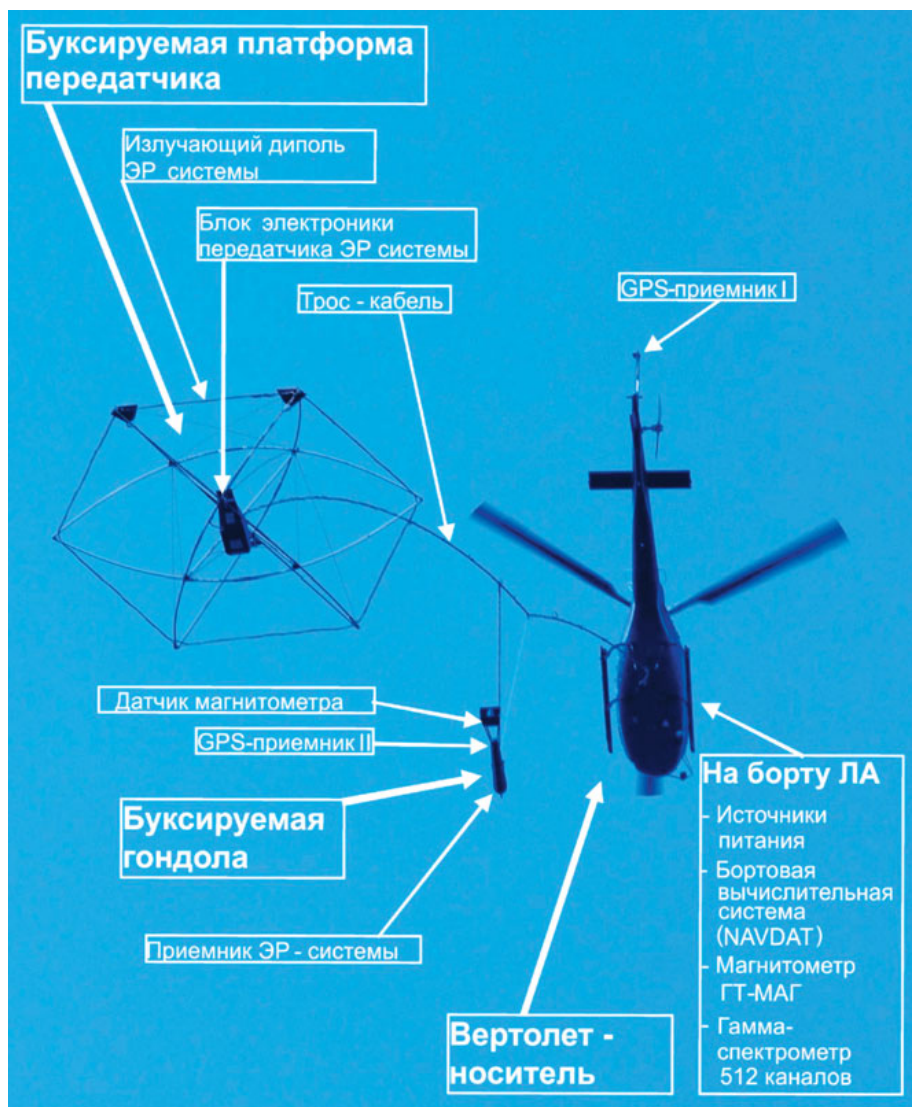
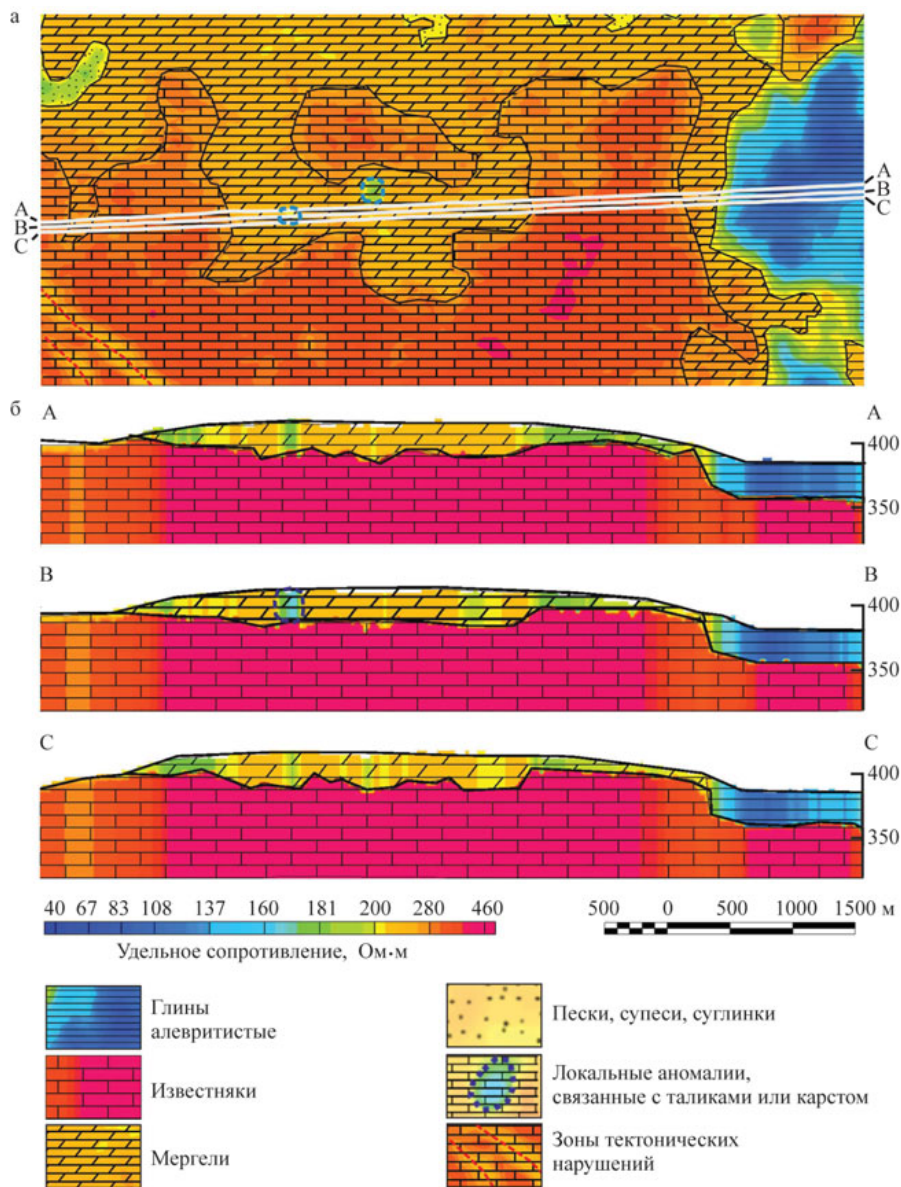
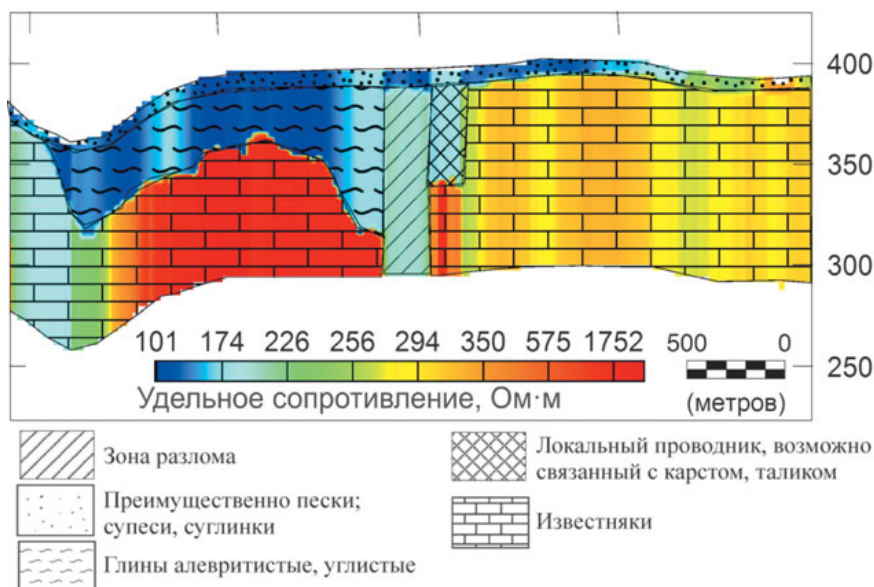


Рис. 1. Аэрогеофизический комплекс «Экватор»





**Рис. 2.** Карта кажущегося сопротивления на эффективной глубине 30 м (а) и геоэлектрические разрезы по результатам 1D-инверсии (б), характеризующие вещественный состав разновозрастных отложений. Вертикальная ось на разрезах — абсолютная высота  $H$ , м



**Рис. 3.** Геоэлектрический разрез по результатам 1D-инверсии. Вертикальная ось — абсолютная высота, м

основной фактор, определяющий такую важную характеристику, как коррозионная активность грунта.

Эффективные алгоритмы одномерной (1D) инверсии для электромагнитных данных позволяют изучать распределение удельных сопротивлений не только в плане, но и по глубине (см. рис. 3) [6], что дает возможность проводить достаточно надежную оценку глубин скального основания и определять литолого-петрологические характеристики грунтов во всем интервале разреза.

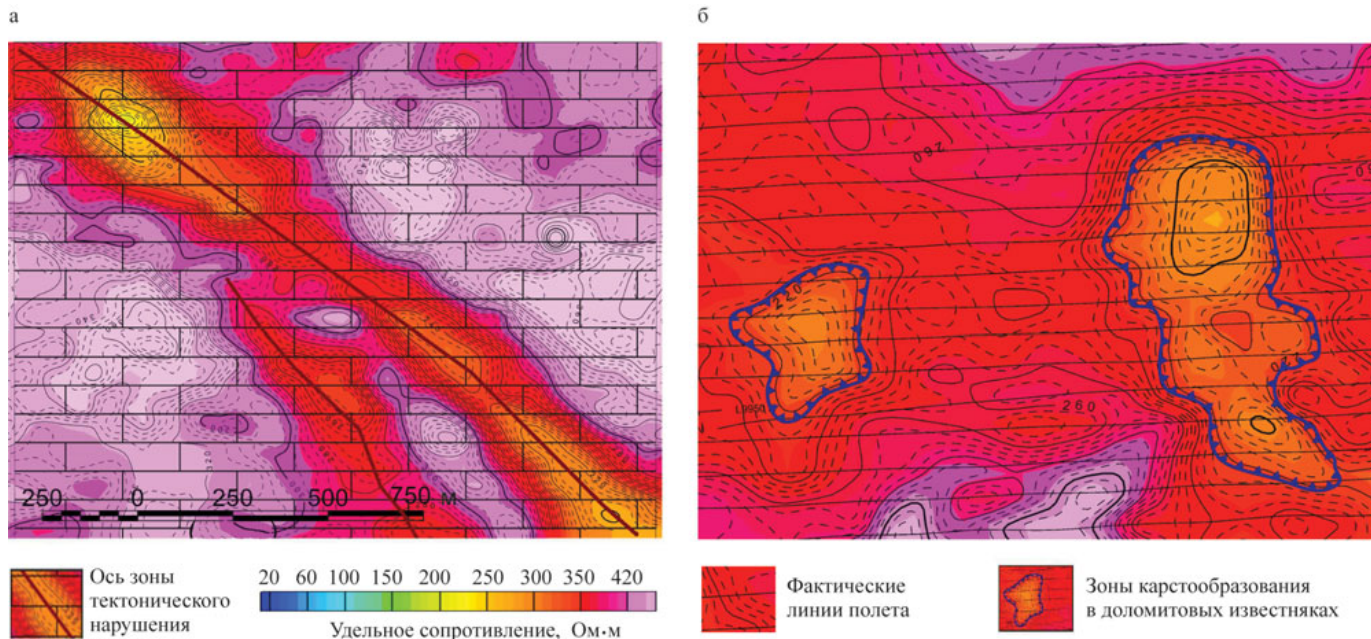
Привязка точек наблюдений происходит с помощью дифференциальной коррекции навигационных данных [7]. Точность определения местоположения в этом случае составляет менее 1 м в плане и по высоте. Совместно анализируя полученные навигационные параметры и показания радиовысотомера, строят высокоточную модель рельефа местности (рис. 5). Эта карта может быть использована для детального геоморфологического анализа и выявления неотектонических элементов строения территории. Совместный анализ информации о рельефе, глубинах скального основания и вещественном составе грунтов может быть полезен для мониторинга районов развития оползней.

Значительный объем детальных исследований масштаба 1:10 000 с целью поиска кимберлитовых тел был выполнен совместно с ВСЕГЕИ им. А.П. Карпинского в пределах Ангольского щита в Западной Африке (рис. 6). Эти материалы также информативны с точки зрения решения задач инженерной геологии. Здесь на дневную поверхность выходят породы кристаллического фундамента архей-протерозойского возраста. Они частично перекрываются терригенными отложениями мелового-четвертичного возраста.

Дополнительно по гранитогнейсам позднего архея широко развиты коры выветривания иногда значительной мощности (до 70 м). Характерной особенностью территории является сильная дифференциация пород, слагающих верхнюю часть разреза, по электрическим и магнитным характеристикам. Кажущиеся сопротивления в пределах площади работ меняются от первых единиц до 10 000 Ом·м (рис. 7). Наличие частотных каналов позволяет надежно измерять сопротивления в таком широком диапазоне.

Аномальное магнитное поле весьма дифференцировано. Амплитуда ано-





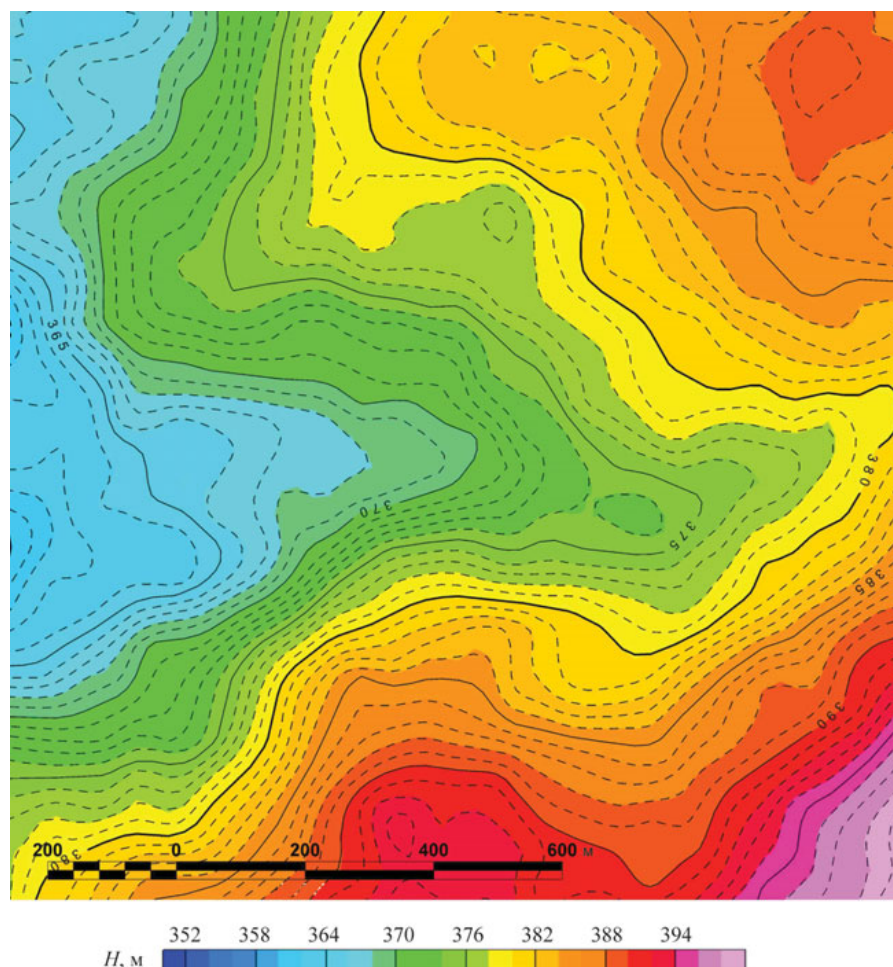
**Рис. 4.** Примеры трассирования тектонических нарушений (а) и картирования зон карстообразования (б) в литологически однородных известняках. Цветная подложка — карта кажущихся сопротивлений для эффективной глубины 30 м. Сечение сплошных изолиний — 20 Ом·м

малый составляет десятки и сотни нанотесла (нТл). Однако использование оригинальных фильтров позволяет выделять слабоинтенсивные локальные изолированные и линейные аномалии различного геологического и геоморфологического генезиса.

Представление выходных электро-разведочных данных как во временной, так и в частотной области является главной отличительной особенностью работы современной аэроэлектроразведочной системы. Для реализации этой возможности была выполнена непрерывная запись измеряемых сигналов с последующим преобразованием данных для представления в частотной области и выделением наиболее значимых гармоник [10]. Впервые непрерывная запись МПП-данных была применена с использованием импульсной системы COTRAN (COrrelation of TRANsients) в 1970-х годах [4]. В устройстве системы были применены совершенно революционные для того времени идеи. Двухкомпонентный (XZ) приемник регистрировал сигнал отклика не только во время паузы, но и во время действия возбуждающего импульса. Вычислительная система обеспечивала коррекцию результатов измерений с учетом влияния вихревых токов в проводящих элементах фюзеляжа летательного аппарата. Уже в 1990-х годах появились первые попытки использовать обработку этих данных в частотной области для исключения различного рода аппаратных погрешностей [8]. В современных систе-

мах такая обработка выполняется для обеспечения высокого качества изменений на самых ранних временах прихода сигналов [9].

Совместная обработка данных во временной и частотной областях позволяет использовать преимущества обоих представлений. Так, частотные



**Рис. 5.** Фрагмент карты относительных превышений ( $H$ ) рельефа местности, построенной по аэрогеофизическим данным. Сечение изолиний составляет 1 м



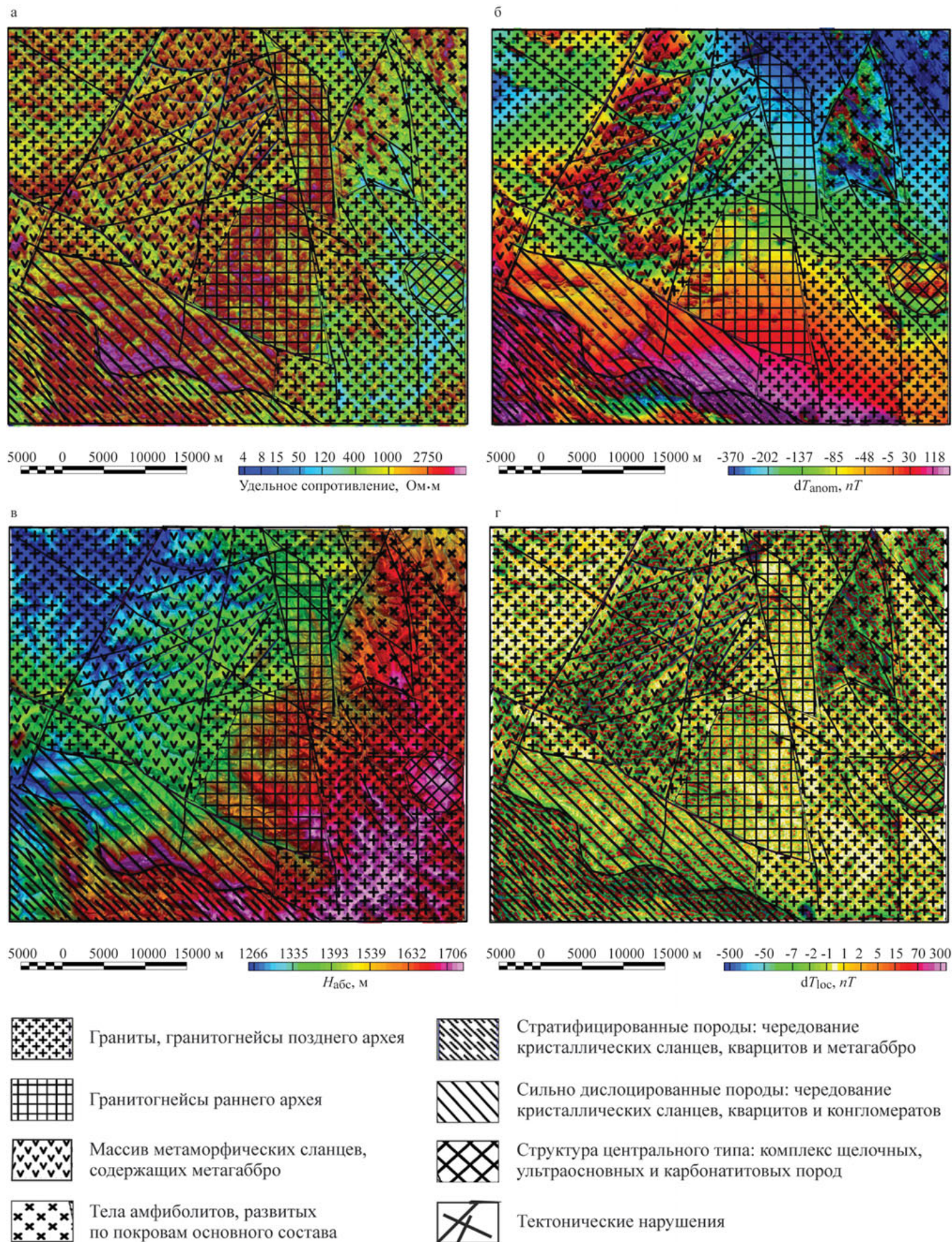
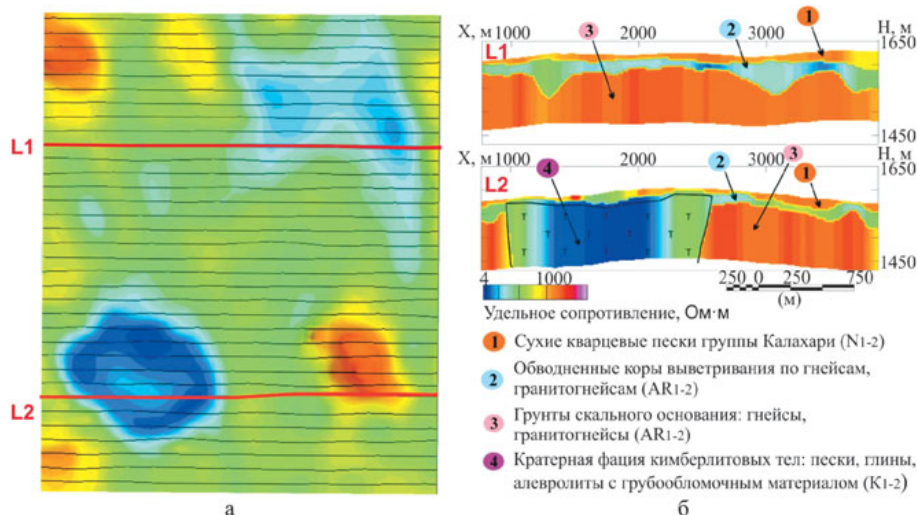


Рис. 6. Результаты картирования литолого-петрологических разновидностей скальных массивов в условиях Ангольского щита: а — карта кажущихся сопротивлений для эффективной глубины 20 м; б — карта аномального магнитного поля; в — цифровая модель рельефа по данным аэрогеофизической съемки; г — карта локальной составляющей аномального магнитного поля. Буквенные обозначения:  $H$  — абсолютная высота;  $\delta T_{anom}$  — аномальное магнитное поле;  $\delta T_{loc}$  — локальная составляющая аномального магнитного поля





**Рис. 7. Пример определения глубины и мощности грунтов, перекрывающих скальное основание: а — карта кажущихся сопротивлений для эффективной глубины 20 м; б — геоэлектрические разрезы по результатам 1D-инверсии данных. Красные линии — линии разрезов  $L_1, L_2$ ; вертикальные оси на разрезах — абсолютная высота  $H, м$ ; горизонтальные оси — расстояние  $X, м$**

каналы обеспечивают определение сопротивлений в существенно более широком диапазоне, чем временные, — от долей до десятков тысяч ом-метров (Ом·м) [5]. Это позволяет надежнее фиксировать изменения сопротивления в высокоомных областях и в верхней части разреза (ВЧР) и, как следствие, более детально картировать структурные особенности ВЧР. Все кривые частотной области, показанные на рис. 8, были получены с учетом только квадратурной компоненты отклика; кривые временной области были получены по результатам измерений производной индукции магнитного поля во времени ( $dB/dt$ ).

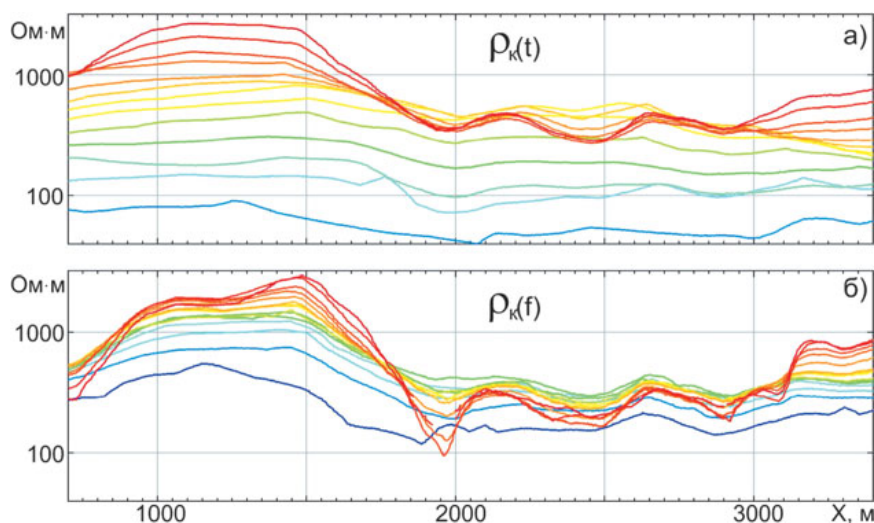
Для пояснения причин проявления разницы между вычисленными сопротивлениями по разным компонентам измеренного сигнала было выполнено моделирование откликов над двухслойным разрезом со следующими параметрами:  $\rho_0$  — удельное сопротивление верхнего слоя;  $d_0=100 м$  — мощность верхнего слоя;  $\rho_1=20 Ом·м$  — удельное сопротивление основания. Чтобы проиллюстрировать неодинаковую чувствительность сигналов во временной и частотной областях именно к изменениям сопротивления верхнего слоя, параметр  $\rho_0$  меняли в диапазоне 10–10 000 Ом·м. На рисунке 9 представлены четыре кривые, демонстрирующие изменения в зависимости от  $\rho_0$  кажущегося сопротивления  $\rho_k$ , рассчитанного: по каналу 5 мкс сигнала поля  $B$ ; по каналу 5 мкс сигнала  $dB/dt$ ; по синфазной компоненте на частоте 12 кГц ( $Re B$ ); по квадратурной компоненте на частоте 12 кГц ( $Im B$ ).

Видно, что при  $\rho_0 < 100 Ом·м$  все кривые кажущихся сопротивлений близки друг к другу и к значению  $\rho_0$ . При больших значениях сопротивления верхнего слоя в синфазной составляющей сигнала самой высокой частоты и в ранних каналах во временной области доминирующую роль начинает играть удельное сопротивление основания. Кажущееся сопротивление, рассчитанное по каналу 5 мкс поля  $B$  выходит на асимптотическое значение в районе 200 Ом·м, а синфазная компонента поля на частоте 12 кГц и канал 5 мкс  $dB/dt$  соответствуют величине 1,2 кОм·м. Если же рассматривать кажущееся со-

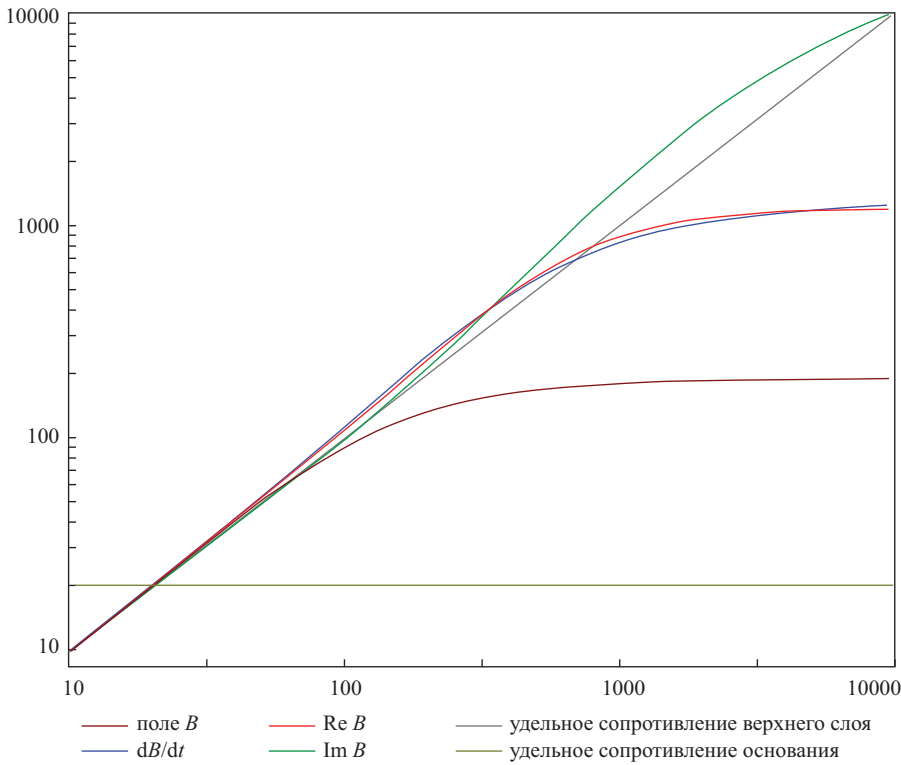
противление, рассчитанное по квадратурной компоненте, то можно увидеть его практически одинаковую чувствительность к сопротивлению верхнего слоя во всем исследуемом диапазоне, несмотря на то что его значения искажены наличием проводящего основания.

Из рисунка 8 также видно, что даже на самой низкой частоте происходит увеличение кажущегося сопротивления в той части, где для высоких частот и «ранних» каналов регистрируется высокоомная зона. В то же время кривые сопротивлений на «поздних» каналах, отражающие распределение их значений по глубине, демонстрируют совсем другое поведение.

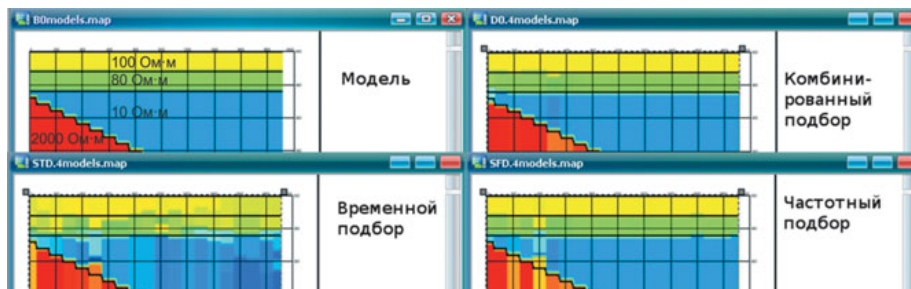
При решении задачи инверсии наличие информации в частотной области также дает дополнительные возможности. На рисунке 10 приведен результат подбора параметров горизонтально-слоистой среды на основании модельных данных во временной и частотной областях для серии горизонтально-слоистых моделей со слабо-контрастной границей в верхней части разреза. Алгоритм решения обратной задачи для всех наборов данных использовался один и тот же. Видно, что при обработке данных временной области лучше определяется сопротивление основания, а в частотной надежнее фиксируется граница в верхней части разреза. При комбинированной же обработке (в минимизации функционала невязки участвуют и временные, и частотные данные) результат подбора наилучшим образом сходится с исходной моделью.



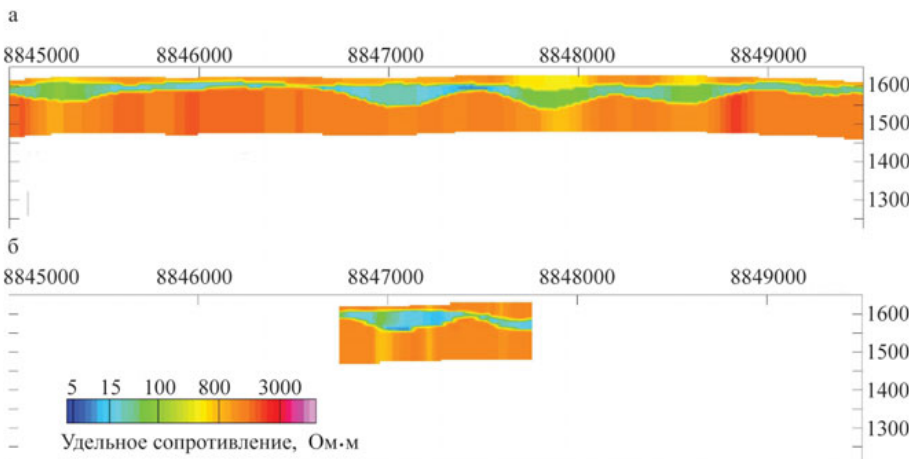
**Рис. 8. Кажущиеся сопротивления  $\rho_k$ : а — во временной области (синяя кривая — для времени  $t$  после выключения тока 4 500 мкс, красная — 5 мкс, остальные — для промежуточных времен); б — в частотной области (синяя кривая — на частоте  $f = 77 Гц$ , красная — 15 046 Гц, остальные — на промежуточных частотах)**



**Рис. 9.** Зависимость кажущегося сопротивления (вертикальная ось, Ом·м) от удельного сопротивления верхней части разреза (горизонтальная ось, Ом·м). Кажущееся сопротивление рассчитывалось: по каналу 5 мкс сигнала поля  $B$ ; по каналу 5 мкс сигнала  $dB/dt$ ; по синфазной компоненте на частоте 12 кГц ( $Re B$ ); по квадратурной компоненте на частоте 12 кГц ( $Im B$ )



**Рис. 10.** Решение одномерной обратной задачи по модельным данным во временной и частотной областях и при комбинированной обработке временных и частотных данных



**Рис. 11.** Сравнение геоэлектрических разрезов, полученных с помощью: а — аэрогеофизического комплекса «Экватор»; б — наземной электроразведочной системы «Цикл-5». Вертикальные оси на разрезах — абсолютная высота, м; горизонтальные оси — условное расстояние, м

Совместный анализ карт сопротивлений, аномального магнитного поля и его локальной составляющей позволяет проводить надежное геолого-геофизическое районирование и на его основе изучать структурно-тектонические особенности территории и выполнять литолого-петрографическое картирование грунтов скальных оснований (см. рис. 6).

Детальная цифровая модель рельефа местности подчеркивает структурно-блоковое строение площади и позволяет выполнить геоморфологический анализ территории для уточнения истории ее неотектонического развития.

Контрастные геоэлектрические границы определяют достаточно высокую сходимость результатов 1D-инверсии исходных профильных данных. Геоэлектрические разрезы (см. рис. 7, рис. 11, 13) хорошо соответствуют априорной геологической информации (по данным бурения заверочных скважин, геоинформационных систем) по глубине и конфигурации границ, а также по уровням сопротивлений.

На территории съемки выделяются три основных типа разрезов:

- *однородное полупространство* — на дневную поверхность выходят высокоомные грунты скального основания;
- *двухслойная модель* — высокоомные грунты скального основания перекрыты низкоомными рыхлыми отложениями четвертичного возраста либо водонасыщенными корами выветривания по грунтам скального основания;
- *трехслойная модель* — по поверхности пород скального основания развиты низкоомные коры выветривания, которые перекрыты высокоомными песками группы Калахари, выходящими на дневную поверхность.

При многократно более высокой производительности аэроданные имеют сопоставимую с наземной съемкой геологическую информативность (рис. 11).

На рисунке 12 приведены примеры геоэлектрических разрезов, которые были получены для всей площади работ в ходе 1D-инверсии исходных электромагнитных данных для каждого съемочного маршрута. На основе таких разрезов была построена карта глубин до грунтов скального основания (рис. 13). Ее также можно рассматривать как карту мощности рыхлых грунтов различного генезиса.



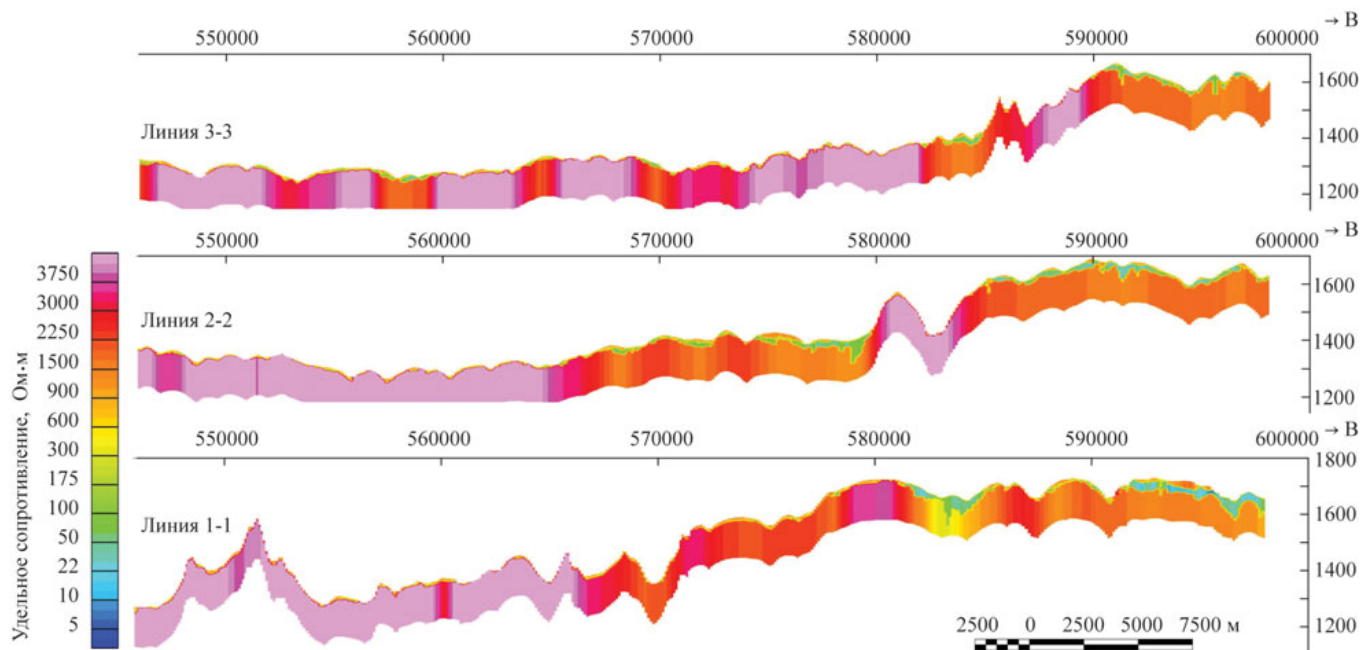


Рис. 12. Геоэлектрические разрезы по результатам 1D-инверсии данных. Вертикальные оси на разрезах — абсолютная высота, м; горизонтальные оси — условное расстояние, м

### Выводы

Детальные площадные аэрогеофизические съемки и анализ их результатов должны носить опережающий характер и предшествовать рассмотрению альтернативных вариантов на этапе детального проектирования прокладки трасс линейных сооружений и локальных площадок под промышленные строения. Такие исследования позволят оптимизировать издержки и рационально выбирать территории для последующих общепринятых инженерно-геологических исследований (бурения, полевых испытаний, наземных геофизических исследований, лабораторных испытаний и т.д.).

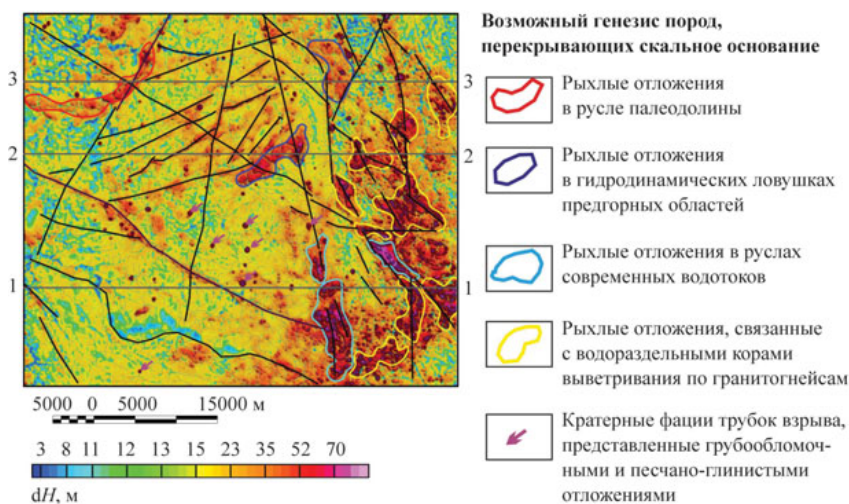


Рис. 13. Карта значений глубины до кровли скального основания (dH), построения по результатам 1D-инверсии всех профильных данных

### Список литературы

1. Волковицкий А.К., Каршаков Е.В., Мойланен Е.В. Новая вертолетная электроразведочная система «Экватор» для метода АМПП // Приборы и системы разведочной геофизики. 2010. № 2. С. 27–29.
2. Козак С.З., Агеев В.В., Мойланен Е.В., Каршаков Е.В., Тхоренко М.Ю. Комплексирование наземного и вертолетного МПП при выделении участков, перспективных для бурения на воду в сложных условиях на примере Якутии / Материалы 11-й Научно-практической конференции и выставки «Инженерная геофизика — 2015». Геленджик: The European Association of Geoscientists and Engineers (EAGE), 2015. С. 1–5.
3. Феликс Ж.Т., Каршаков Е.В., Мельников П.В., Ванчугов В.А. Результаты сопоставления данных аэро- и наземных электроразведочных систем, используемых при поисках кимберлитов в республике Ангола // Геофизика. 2014, EAGO. № 4. С. 17–22.
4. Becker A., Barringer A.R., Annan A.P. Airborne electromagnetics, 1978–1988: developments and application of modern airborne electromagnetic surveys // United States Geological Survey Bulletin. V. 1925. 1987. P. 9–20.
5. Hodges G. The power of frequency domain: when you should be using it / Proceedings of the 13-th SAGA Biennial and 6-th International AEM Conference. Mpumalanga, South Africa, 2013. P. 5.
6. Jupp D.L.B., Vozoff K. Stable iterative methods for the inversion of geophysical data // Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society. 1975. V. 42. P. 957–976.
7. Kee C., Parkinson B.W., Axelrad P. Wide area differential GPS // Navigation. Manassas, Virginia, USA: Institute of Navigation, 1991. V. 38. № 2. P. 123–146. URL: [http://ion.org/search/view\\_abstract.cfm?jp=j&idno=207](http://ion.org/search/view_abstract.cfm?jp=j&idno=207).
8. Lane R., Plunkett C., Price A., Green A., Hu Y. Streamed data — a source of insight and improvement for time domain airborne EM // Exploration Geophysics. 1998. V. 29. P. 16–23.
9. Macnae J., Baron-Hay S. Reprocessing strategy to obtain quantitative early time data from historic VTEM surveys. Sydney, Australia: ASEG, 2010. 4 p.
10. Volkovitsky A., Karshakov E. Airborne EM systems variety: what is the difference / Proceedings of the 13-th SAGA Biennial and 6-th International AEM Conference. Mpumalanga, South Africa, 2013. 4 p.