

Московский государственный университет
имени М.В. Ломоносова

Геологический факультет



НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

***ЛОМОНОСОВСКИЕ
ЧТЕНИЯ***

СЕКЦИЯ ГЕОЛОГИИ

***Подсекция
геофизики***

Руководитель – зав. кафедрой, профессор Булычев А.А.

СБОРНИК
ТЕЗИСОВ ДОКЛАДОВ

Москва
2022

Содержание:

1. Возможности подавления влияния паразитных емкостных связей между питающими и приемными линиями при производстве электротомографических измерений М.Н. Марченко	2
2. Физико-геологическая модель разреза опорной скважины МГУ Б.А. Никулин, А.А. Никитин, А.Ю. Паленов	6
3. Влияние контактного сопротивления электродов на измерения электрического поля Н.И. Зорин, Д.В. Епишкин, А.Г. Яковлев	9
4. Применение гамма-спектрометрии с борта беспилотного воздушного судна при картировании терригенно-осадочных пород И.Н. Модин, А.Ю. Паленов, Н.Л. Шустов, А.А. Фадеев, К.В. Петрова	11
5. Аэромагнитная съемка с борта беспилотного воздушного судна в районе Крымской и Александровской баз практик А.Ю. Паленов, Н.Л. Шустов, Л.А. Золотая	14
6. Изучение Почтовской магнитной аномалии по материалам геолого-геофизических исследований А.В. Филиппович, Л.А. Золотая, М.В. Коснырева	20
7. Комплексные геофизические поиски фундамента древнегреческой базилики на Борисоглебском грязевом вулкане И.Н.Модин, В.А.Шевченко, А.Д.Скобелев, А.Д.Приходько, Е.Ю. Гиренко	24
8. Инженерно-геофизические исследования при изучении линейного сооружения в Ленинградской области И.Н. Модин, А.Д. Скобелев, Д.К. Большаков, М.И. Богданов	31

ВОЗМОЖНОСТИ ПОДАВЛЕНИЯ ВЛИЯНИЯ ПАРАЗИТНЫХ ЕМКОСТНЫХ СВЯЗЕЙ МЕЖДУ ПИТАЮЩИМИ И ПРИЕМНЫМИ ЛИНИЯМИ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

М.Н. Марченко

При работах методом электротомографии (многоэлектродная модификация метода сопротивлений) питающие и приемные линии размещаются в общих многожильных косах длиной до первых сотен метров. В таких условиях возникают значительные паразитные емкости между линиями в косе, что приводит к сильным искажениям измеряемых сигналов (см. Рис. 1).

Традиционный способ борьбы с такими эффектами заключается в понижении рабочей частоты до величин менее 1 Гц, отказ от частотной обработки сигналов – фактически, переход на постоянный ток.

Минимальные амплитуды уверенно измеряемых сигналов при таком подходе составляют первые мВ. Более слабые сигналы измерять с нужной точностью не получается. Для увеличения полезного сигнала применяют мощные (до 1 кВт) генераторы с большими выходными токами (до 1÷2 А) и напряжениями (до 1000 В). Существуют экземпляры аппаратуры с мощностями генераторов в десятки кВт и токами до десятков А.

В настоящей работе рассматривается новый способ (алгоритм) выполнения измерений сигналов в частотной области с подавлением искажений, связанных с емкостями (и индуктивностями) длинных питающих и приемных линий.

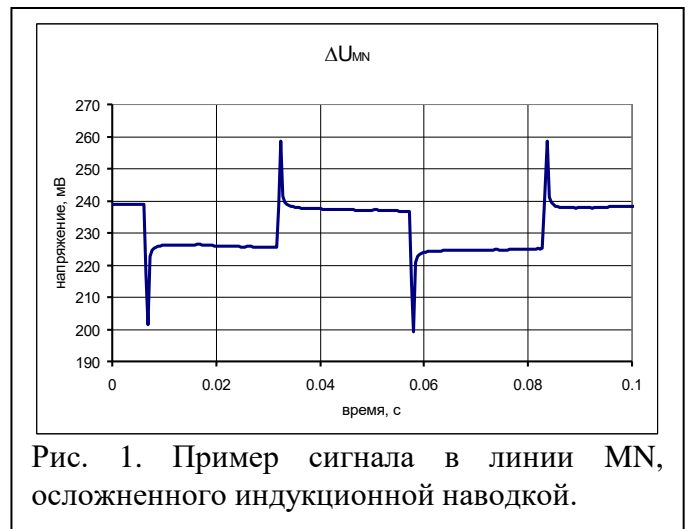


Рис. 1. Пример сигнала в линии MN, осложненного индукционной наводкой.

1. Эквивалентная электрическая схема электроразведочного канала

Эквивалентная электрическая схема электроразведочного канала (без учета паразитных емкостей) содержит резисторы R_a , R_b , R_m , R_n – имитирующие переходные сопротивления соответствующих электродов. Переходные сопротивления могут иметь большой разброс от первых кОм до сотен кОм и более. Хорошими заземлениями считаются линии с переходными сопротивлениями не более 3÷5 кОм. Более 50 кОм – это плохие заземления, получить адекватные результаты наблюдений при этом затруднительно.

Эквивалентное сопротивление грунта ($R_{\text{ГРУНТА}}$) много меньше переходных сопротивлений электродов и имеет значения, как правило, до 100 Ом (в большинстве случаев – 0,001÷1 Ом).

Полная эквивалентная электрическая схема электроразведочного канала с учетом паразитных емкостных связей линий АВ и MN приведена на Рис. 2.

Причем, все конденсаторы имеют различные значения емкости. Именно эта асимметричность создает ЭДС наводки в приемной линии.

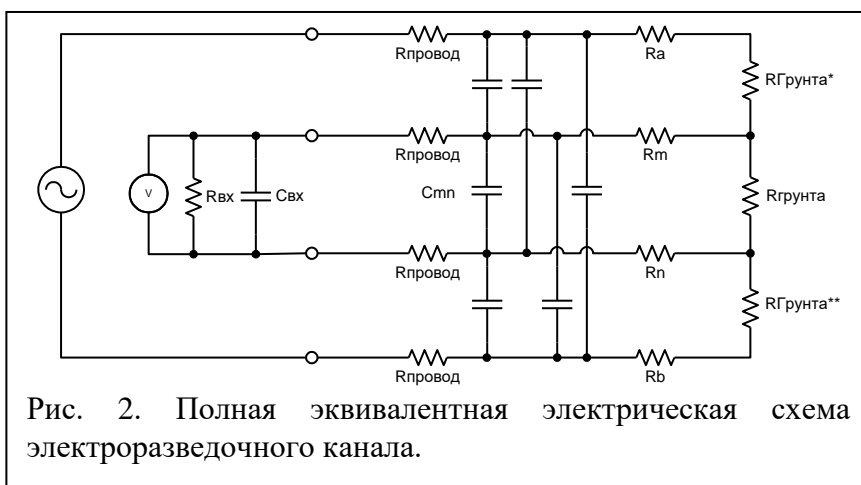


Рис. 2. Полная эквивалентная электрическая схема электроразведочного канала.

2. Искажения сигналов в реальном электроразведочном канале

При выполнении измерений в реальном электроразведочном канале по «стандартной» схемой обработки - $R_{\text{ИЗМ}} = \square U_{\text{MN}} / I_{\text{АВ}}$ (где $\square U_{\text{MN}}$ и $I_{\text{АВ}}$ - модули амплитуд сигнала и тока на рабочей частоте генератора), полученные результаты значительно отличаются от «истинных» ($R_{\text{ИЗМ}} \neq R_{\text{ГРУНТА}}$). Рассмотрим некоторые причины таких искажений.

Искажение силы тока

Поскольку нагрузка генератора в реальной ситуации носит комплексный характер (см. рис. 3.), то сила выходного тока смещена по фазе относительно выходного напряжения. При этом сила тока, текущего через грунт, определяется только активным (резистивным) сопротивлением цепи.

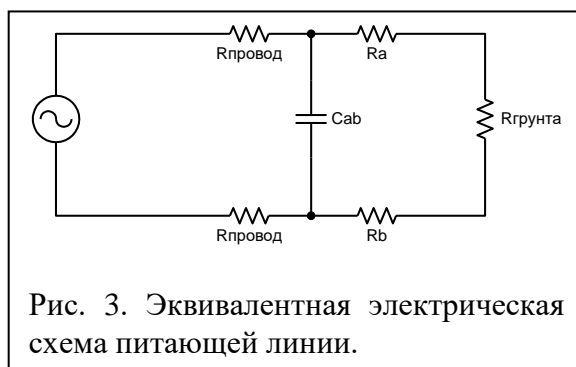


Рис. 3. Эквивалентная электрическая схема питающей линии.

Этот компонент тока является реальным, т.е. не имеет сдвига по фазе относительно выходного напряжения.

Добавление паразитной шунтирующей емкости создает часть тока, имеющего сдвиг по фазе $\pi/2$ относительно выходного напряжения. При этом модуль выходного тока генератора увеличивается при неизменности тока, протекающего через активную часть цепи. Мнимая компонента тока, обусловленная реактивной компонентой нагрузки, может быть сравнима с реальной компонентой тока.

Падение напряжения на $R_{\text{ГРУНТА}}$ синфазно с выходным напряжением генератора.

Для корректного выполнения измерений необходимо учитывать только реальную компоненту тока, которая не имеет сдвига по фазе относительно выходного напряжения генератора.

Наводки на приемную линию

Наводки паразитных сигналов на приемную линию от питающей линии имеют емкостную и индуктивную природу. Присутствующие паразитные емкости (и индуктивности) между питающими и приемными линиями образуют дифференцирующие цепи (ФВЧ), по которым в приемных линиях возбуждается ЭДС наводки. Амплитуды наводок могут быть значительными, в т.ч. многократно превышать амплитуду полезного сигнала.

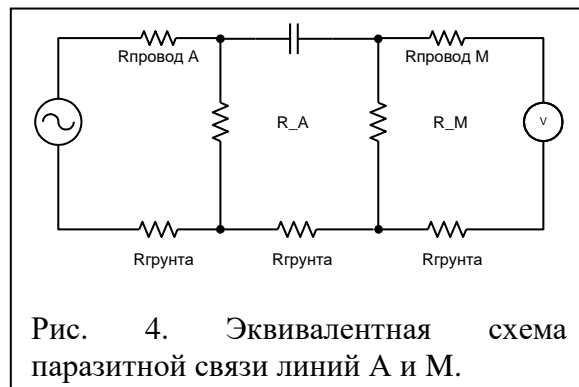


Рис. 4. Эквивалентная схема паразитной связи линий А и М.

В силу емкостного и индуктивного происхождения указанные наводки имеют сдвиг по фазе относительно выходного напряжения генератора. При этом полезный сигнал (падение напряжения на $R_{\text{ГРУНТА}}$) синфазен с выходным напряжением генератора (т.е. находится в реальной компоненте).

Искажение сигнала в MN

Искажение принимаемого сигнала в приемной линии MN связано с влиянием следующих факторов:

- Паразитный ФНЧ фильтр, образуемый переходными сопротивлениями электродов и паразитной емкостью линии.
- Делитель, образуемый входным сопротивлением измерителя и переходными сопротивлениями электродов.

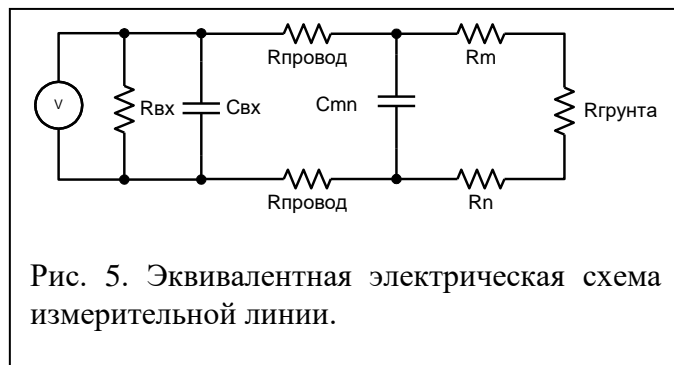


Рис. 5. Эквивалентная электрическая схема измерительной линии.

Необходимо отметить, что оба перечисленных фактора оказывают заметное влияние на результаты наблюдений только при плохих сопротивлениях заземления приемных электродов.

Для компенсации указанных искажений необходимо знать величины сопротивлений и емкостей цепи. В этом случае, можно вычислить поправку в результаты наблюдений.

3. Методика выполнения измерений

Для выполнения корректных измерений с учетом и компенсацией указанных выше искажений, характерных при работе с длинными косами, предлагается следующий способ.

- Применять гармоническую форму выходного напряжения / тока генератора.
- Выполнять синхронную регистрацию не только $\square U_{MN}$ и I_{AB} , но и U_{AB} - выходного напряжения генератора. При обработке вычислять фазовые сдвиги.
- Выполнять «прозвон» питающих и приемных линий с определением активных и реактивных значений сопротивлений цепей AB и MN .
- При обработке результатов измерений:
 - Вычислять фазы $\square U_{MN}$ и I_{AB} относительно U_{AB} .
 - В расчетах использовать амплитуду действительной компоненты тока в питающей линии (синфазной с напряжением генератора).
 - В расчетах использовать амплитуду действительной компоненты сигнала в приемной линии (синфазной с напряжением генератора).
 - Вычислять и вводить поправки за искажения сигнала в приемной линии (за паразитные делитель и ФНЧ) с учетом значений сопротивлений заземления электродов M и N , входных сопротивлений и емкости измерителя и паразитной емкости линии.

Заключение

Ожидается, что реализация предлагаемых алгоритмов регистрации и обработки сигналов в перспективных образцах аппаратуры электротомографии позволит выполнять корректную обработку данных в частотной области.

Что, в свою очередь, позволит:

- выполнять электротомографические измерения на сравнительно высокой частоте;
- за счет использования узкополосной фильтрации, значительно повысить разрешающую способность, чувствительность и помехозащищенность измерительных узлов аппаратуры;
- снизить требования к мощности генераторных узлов аппаратуры;
- снизить требования к качеству заземлений электродов установки.

Достижение описанных результатов позволит улучшить пользовательские характеристики аппаратуры электротомографии и расширить возможности практического применения метода.

ФИЗИКО – ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАЗРЕЗА ОПОРНОЙ СКВАЖИНЫ МГУ

Б.А. Никулин, А.А. Никитин, А.Ю. Паленов

Физико-геологическая модель (ФГМ) – это обобщенное представление о реальном геологическом объекте и геофизических полях.

В данном сообщении приводятся результаты формирования двух частных ФГМ карбонатного разреза (Тиман) и по разрезу опорной скважины МГУ, направленных на выделение: 1 - однородных литолого-фациальных зон и 2 – оценка содержания органического вещества (ОВ). В настоящей работе были использованы результаты построения геологической лито-фациальной модели (рис.1) одного из районов вала Гамбурцева, проведена привязка ее к ГИС (Жемчугова В.А.).

Оценка литолого – фациальных зон карбонатных пород (Тиман)

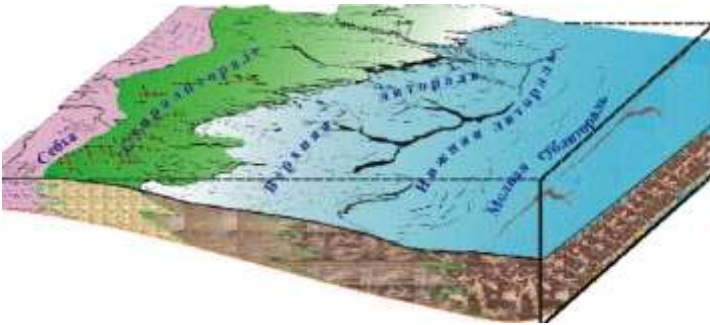


Рис.1. Схема приливно-отливной равнины (по Жемчуговой В.А.)

Ниже приводятся результаты статистической обработки данных. На рис.2 представлены графики пяти методов ГИС по отношению к F 1÷4.

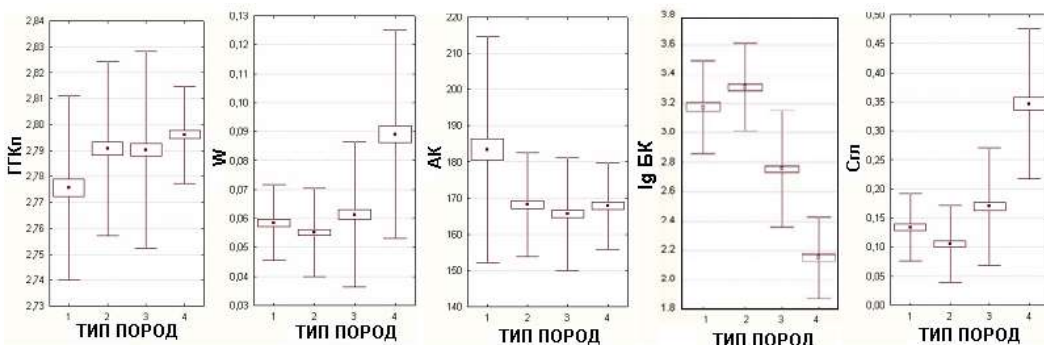


Рис.2. Графики пяти методов ГИС по отношению к типу пород F 1÷4.

Как видно, ни один из методов однозначно все фации не выделяет. Для определения типа фации по эталонным данным комплекса ГИС (ГК, БК, WНК, АК, ГГКп) было рассчитано уравнение множественной линейной регрессии. Это уравнение имеет следующий вид:

$$F(1÷4) = -2,47 \cdot \text{ГГКп} - 1,04 \cdot \lg \text{БК} + 4,8 \cdot W - 0,16 \cdot \text{АК} + 0,71 \cdot \text{Cпл} + 14,8$$

где $F(I \div 4)$ – тип фации. $r=0.86$

Оценка содержания ОВ геофизическими и геохимическими методами.

Исходными данными для исследований были каротажные измерения в скважине №1 МГУ методами: ГК-С(U,Th,K), БК, ГГМ-п; петрофизические и геохимические измерения проводились на кернах скважины: пиролиз (Rock-Eval), газовые хроматографы, спектральный рентгеновский анализ, ГМ, Кп, , плотностной ГГМ и др. При анализе учитывалась стратиграфия и геологическое описание кернов [1].

Разрез скважины представлен чередованием доломита, мергеля, гипса и песчано-глинистых слоев. В верхней части разреза присутствует чисто угольный пласт. Из коллекции кернов выделены 15 представительных образцов и проведен геохимический анализ в лаборатории ВНИИГеосистем. В результате анализа получены параметры и коэффициенты пиролиза, содержание ОВ, метана и других компонентов сорбированных газов.

Результаты пиролиза образцов представлены на рисунке 3. Из общего объема информации результатов геохимического анализа выделены: содержание ОВ и метана, а также тип керогена и степень его преобразованности. По соотношению T_{max} и H_1 можно предположить, что мы имеем дело с керогеном смешанного гумусо-сапропелевого типа с крайне низким уровнем преобразованности (стадия ПК). Содержание ОВ и метана отражены в таблице 1.

Используя содержание ОВ в качестве эталона, проведен регрессионный статистический многомерный анализ данных ГИС, петрофизики и метана на предмет их взаимосвязи с ОВ в породе. В таблице 1 приводятся результаты вычислений с коэффициентами корреляции (r).

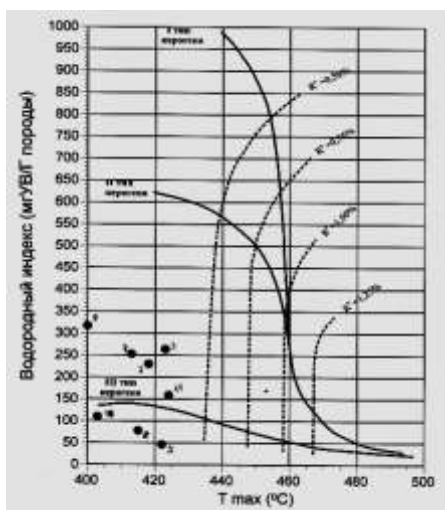


Таблица 1

ОВ от 0.27 до 28 (вес.%)
CH ₄ от 1 до 25 (10-2 см ³ /кг)
ОВ= F (Th/K, Th/U), $r = 0.86$
ОВ= F (Th/K, Th/U, CH ₄), $r = 0.95$

Рис. 3. Результаты пиролиза образцов

Корреляция ОВ с отношениями Th/K и Th/U достаточно высока и может использоваться на практике. Корреляция ОВ с метаном, Th/K , Th/U еще выше, при этом основную факторную нагрузку несет метан. Соотношения U, Th, K в спектрометрическом методе ГМ-С являются весьма информативными и отражают в себе как минералогическую, так и фациальную обстановку разреза скважины. В плане практического применения, следует заметить также, что информацию о содержании метана можно получить из результатов газового каротажа.

Заключение

Полученные результаты позволяют по данным радиометрии (ГМ-С) и других методов каротажа расчленять фациальную зону на компоненты, оценивать концентрацию ОВ и формулировать критерии выделения нефтематеринских интервалов.

Литература:

1. Пекин А.А., Гатовский Ю.А., Поляной Б.В. Верхнедевонские и нижнекаменноугольные отложения юго-запада московской синеклизы по данным бурения Александровской скважины (Калужская область) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. геология. 2011. №1.

ВЛИЯНИЕ КОНТАКТНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОДОВ НА ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Н.И. Зорин ^{1,2}, Д.В. Епишкин ², А.Г. Яковлев ^{1,2}

¹ООО «Северо-Запад», Москва, Россия

²МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

При проведении электроразведочных работ на мерзлой или каменной почве добиться хорошего качества заземления электродов практически невозможно. В таких условиях результаты измерения высокочастотного электрического поля нередко оказываются смещенными, что связано с появлением емкостных утечек в приемных линиях, а также эффектом деления напряжения в измерительной цепи. Для описания искажающих эффектов, связанных с высоким сопротивлением заземления, или «ECR (electrode contact resistance) – эффектов» [1], рассмотрим упрощенную эквивалентную схему классической заземленной приемной линии (рис. 1).

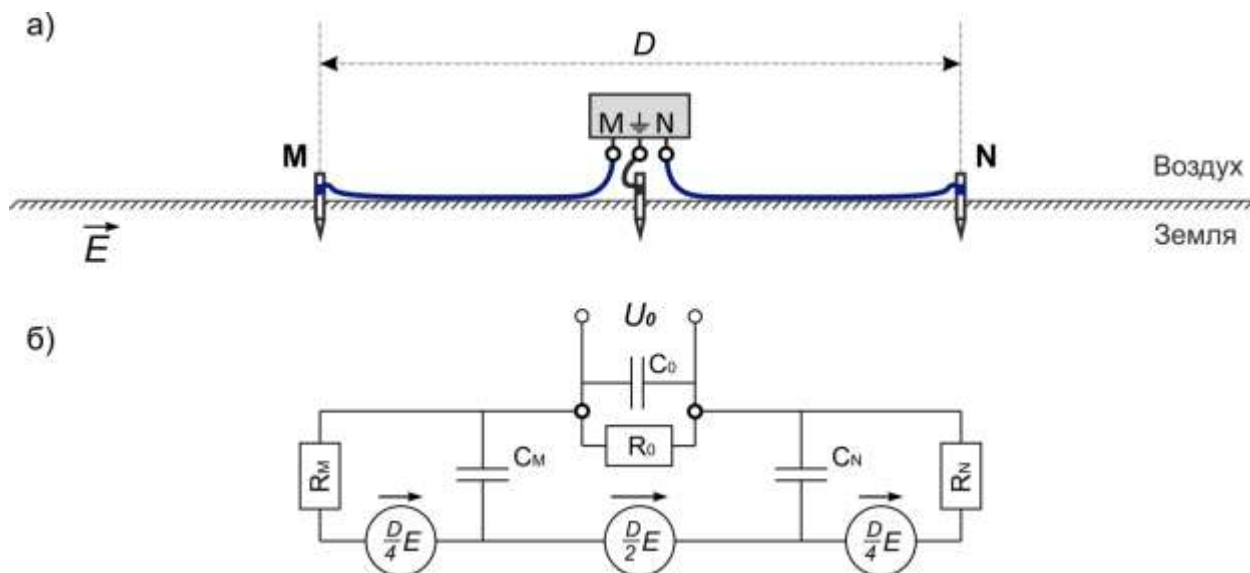


Рис. 1. Классическая приемная линия (а) и ее упрощенная эквивалентная схема (б).

В соответствии с приведенной на рис. 1 схемой, связь между напряжением U на входе измерителя и электрическим полем E в земле имеет вид:

$$U(\omega) = \left(\frac{0.5 + \frac{0.25}{1 + i\omega R_M C_M} + \frac{0.25}{1 + i\omega R_N C_N}}{1 + \frac{Z_{MN}(\omega)}{Z_0(\omega)}} \right) DE(\omega), \quad (1)$$

где ω – круговая частота, i – мнимая единица, $Z_0 = R_0/(1 + i\omega R_0 C_0)$ – входной импеданс измерителя, а $Z_M = R_M/(1 + i\omega R_M C_M)$, $Z_N = R_N/(1 + i\omega R_N C_N)$ и $Z_{MN} = Z_M + Z_N$ – импедансы полулинии М, полулинии N и линии MN, соответственно. Выделяя в формуле (1) обусловленный емкостными утечками с проводов коэффициент K_{MN} и связанный с эффектом деления напряжения на входе измерителя коэффициент K_0 , получаем

$$U(\omega) = K_0(\omega)K_{MN}(\omega)DE(\omega), \quad (2a)$$

$$K_0(\omega) = \frac{Z_0(\omega)}{Z_0(\omega) + Z_{MN}(\omega)}, \quad (2б)$$

$$K_{MN}(\omega) = 0.5 + \frac{0.25}{1 + i\omega R_M C_M} + \frac{0.25}{1 + i\omega R_N C_N}. \quad (2в)$$

Итак, для идеально заземленной линии из формулы (2) имеем $K_{MN} \equiv K_0 \equiv 1$, и напряжение U связано с измеряемым электрическим полем E простым соотношением

$$U(\omega) = DE(\omega). \quad (3)$$

В реальной приемной линии регистрируемое измерителем напряжение тем больше отличается от ожидаемой величины (3), чем больше отличие от единицы коэффициентов K_{MN} и K_0 . В настоящем докладе мы подробно рассматриваем влияние каждого из них, а также различные подходы к борьбе с соответствующими искажениями.

Литература:

1. Zonge K.L., Hughes L.J. Effect of electrode contact resistance on electric field measurements // Expanded Abstr. 1985 Technical Programme of 55th Ann. Intern. SEG Meeting, contrib. MIN 1.5. 1985. Tulsa, OK. P. 231–234.

ПРИМЕНЕНИЕ ГАММА-СПЕКТРОМЕТРИИ С БОРТА БЕСПИЛОТНОГО ВОЗДУШНОГО СУДНА ПРИ КАРТИРОВАНИИ ТЕРРИГЕННО-ОСАДОЧНЫХ ПОРОД

И.Н. Модин, А.Ю. Паленов, Н.Л. Шустов, А.А. Фадеев, К.В. Петрова

Задача оперативного поиска песчанно-гравийных смесей (ПГС) с борта легкого беспилотного воздушного судна (БВС) актуальна в первую очередь для строительства дорог в районах активной разработки месторождений полезных ископаемых. В связи с этим, были проведены опытно-методические работы по применению метода гамма-спектрометрии с борта беспилотного воздушного судна для поиска латеральных границ месторождений ПГС (песка). Теоретическим обоснованием возможности такого подхода послужили оценки степени затухания гамма-излучения над месторождениями песка на фоне достаточно активного излучения глин. Таким образом, искомые залежи песка на поверхности должны выделяться в виде отрицательных аномалий активности гамма-излучения. Конечно перекрытие месторождений песка почвенно-растительным слоем (ПРС) должно вносить искажения в ожидаемые результаты в зависимости от мощности ПРС и его радиоактивности.

Для практического опробования методики были проведены комплексные геолого-геофизические исследования на площади 0.7 кв. км в районе учебно-научного полигона Геологического факультета МГУ «Александровка» (Юхновский район, Калужской области). Предварительно, по данным бурения и наземной электроразведки (методы дипольного индукционного профилирования, вертикального электрического зондирования, электротомографии) были выделены латеральные границы месторождения песка мощностью до 9 метров перекрытого ПРС. Затем была применена наземная гамма-спектрометрическая съемка (использовался гамма-спектрометр МКСП-01 разработанный в НТЦ «Радэк»), результаты которой позволили выделить отрицательные аномальные зоны гамма-излучения, совпадающие с расположением месторождений песка. Однако при анализе спектров гамма-излучения стало очевидно, что такое совпадение имеет место практически только в интегральном канале (рис. 1), каналы, соответствующие излучению тория (Th) и радия (Ra), фактически не имеют корреляции с искомым объектом, а в канале, соответствующем излучению калия (K), корреляция очень слабая.

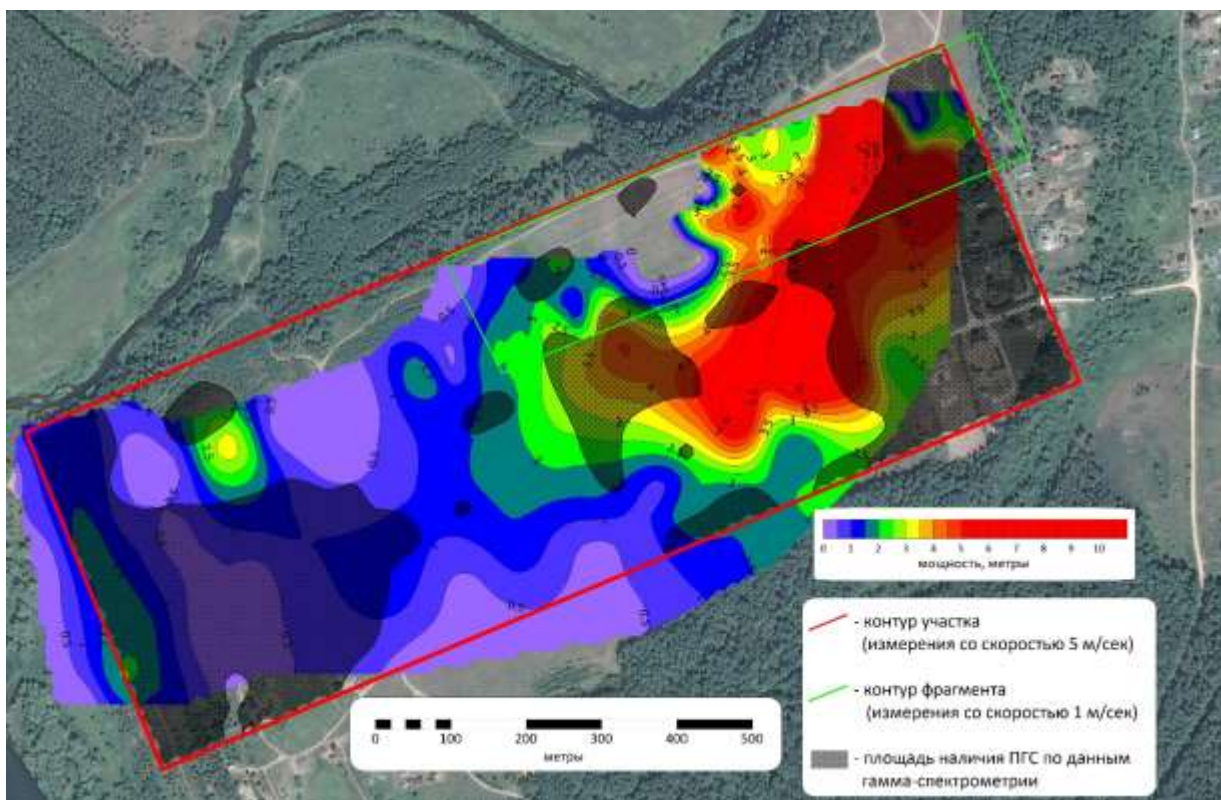


Рис. 1. Сопоставление контуров ПГС, определенных по данным наземной гамма-спектрометрической съемки, и мощности ПГС по априорной информации.

Следующим принципиальным вопросом стала проблема затухания гамма-излучения с высотой. По теоретическим оценкам, на высоте 40 метров величина гамма-излучения должна соответствовать примерно 0.7 от ее значения на поверхности земли. Но необходимо учесть, что для экономически эффективного практического применения необходимо использовать легкие БВС способные поднимать полезную нагрузку весом до 5 кг. А это обуславливает установку датчиков гамма-излучения очень маленького объема (0.4 литра), что сильно ограничивает их чувствительность. Повышение же точности воздушной съемки за счет уменьшения скорости полета БВС вплоть до измерений в режиме зависания сильно уменьшает практическую эффективность использования БВС. Для определения оптимальных параметров воздушной гамма-спектрометрической съемки с борта БВС, были выполнены площадные исследования с разной скоростью полета (1 м/с, 5 м/с и в режиме зависания). В итоге результирующие данные при скорости 5 м/с (рис.2) оказались наиболее приемлемыми как по совпадению с контурами наземной съемки, так и по практической эффективности проведения полевых работ. Интересным моментом, безусловно, является даже некоторое повышение точности съемки со скоростью 1 м/с по сравнению со съемкой в режиме зависания. Это связано с интегральным пространственным накоплением сигнала излучения, хотя конечно такое накопление приводит к некоторому «размытию» точки записи.

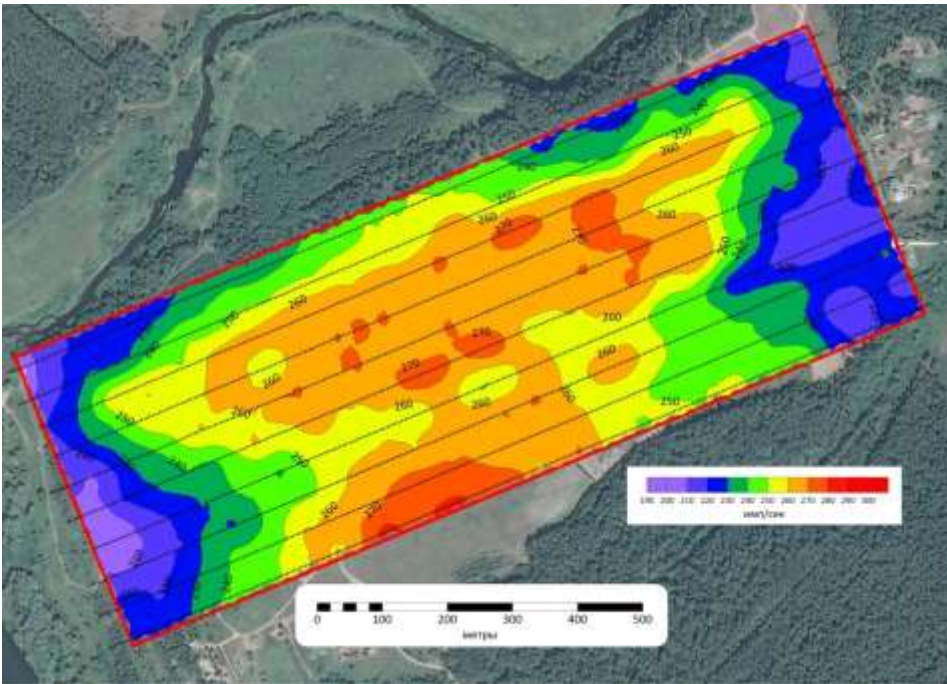


Рис. 2. Карта распределения гамма-активности в интегральном канале, полученная с использованием беспилотного аэрогеофизического комплекса «Геоскан 401».

Анализ итоговой карты сравнения пространственного распределения гамма-излучения, полученного с применением воздушной съемки с БВС и распределения отложений песка полученного по априорным геолого-геофизическим данным показывает достаточную эффективность методики для проведения поисковых работ. Однако, недостаточное совпадение контуров месторождения говорит о влиянии ПРС и необходимости учета мощности и характеристик ПРС для проведения разведочных работ. Получить характеристики ПРС скорее всего возможно с применением легких БВС методами мультиспектральной и гиперспектральной съемок.

АЭРОМАГНИТНАЯ СЪЕМКА С БОРТА БЕСПИЛОТНОГО ВОЗДУШНОГО СУДНА В РАЙОНЕ КРЫМСКОЙ И АЛЕКСАНДРОВСКОЙ БАЗ ПРАКТИК

А.Ю. Паленов, Н.Л. Шустов, Л.А. Золотая

Научно-технический прогресс в областях беспилотных летательных аппаратов и роботизированных систем позволил создать новый вариант магниторазведки – беспилотную аэромагниторазведку [1]. Уже в первые годы появления этого варианта магнитной съемки стало очевидно, что беспилотные съемки предоставляют значимые преимущества по сравнению с традиционными решениями, и должны быть оперативно внедрены в практику геологической разведки. Появилась возможность получать данные магнитного поля со скоростью аэросъемки и точностью наземной разведки. Усовершенствованная система управления полетов при аэромагнитных измерениях позволяет совершать полеты на разных высотах, с различной скоростью, а также с генеральным и детальным обтеканием рельефа изучаемой местности.

Беспилотные методы в целом позволяют снизить затраты на съемку, повысить ее доступность по сравнению с аэровариантом, повысить производительность по сравнению с наземной, а кроме того, по сравнению с аэромагниторазведкой – безопасно для экипажа снизить высоту и скорость полета. При этом, в связи с принципиально различными возможностями существующих типов беспилотных носителей, в беспилотных съемках выделяется два подвида, существенно отличающихся по характеру получаемого геологического результата, производительности, стоимости работ – «низкополетные» и «маловысотные» (таб. 1).

Таблица 1

Задачи, решаемые различными вариантами геофизических методов

Аэро (пилотируемые)		Десятки - сотни	Самолет, вертолет	Геологическое картирование	
Беспилотные	Низкополетные	от 25	БПЛА (самолет, конвертоплан, вертолет)	Детальное геологическое картирование, поиски и разведка месторождений	В условиях Сложной проходимости на больших площадях
	Маловысотные («квазиназемные»)	от 5	БПЛА (мультикоптер, вертолет)		В условиях сложного рельефа на отдельных лицензионных участках
Наземные		0-2	Судно, автомобиль, оператор	Поиски и разведка месторождений	

В 2021 году на кафедре геофизических методов исследования земной коры был приобретен аэромагнитный комплекс для измерений на беспилотном воздушном судне (БВС). После опробования и тестирования аэромагнитного комплекса, кафедра приняла

решение включить маловысотные аэромагнитные съемки в программу обучения бакалавров геофизической и геологической специальностей на учебных практиках в Крыму и на геофизическом полигоне Александровской базы учебных геофизических практик в Калужской области. Полученные результаты впервые обсуждаются в настоящем исследовании.

В ходе учебной практики на Крымской учебной базе имени А.А.Богданова геологического факультета беспилотные аэромагнитные исследования проводились в районе распространения интрузивного комплекса средней юры (J_{2bs}) к западу от с. Трудюлюбовка Бахчисарайского р-на – традиционном районе наземных магнитометрических практик (рис. 1), так называемом «розовом поле».

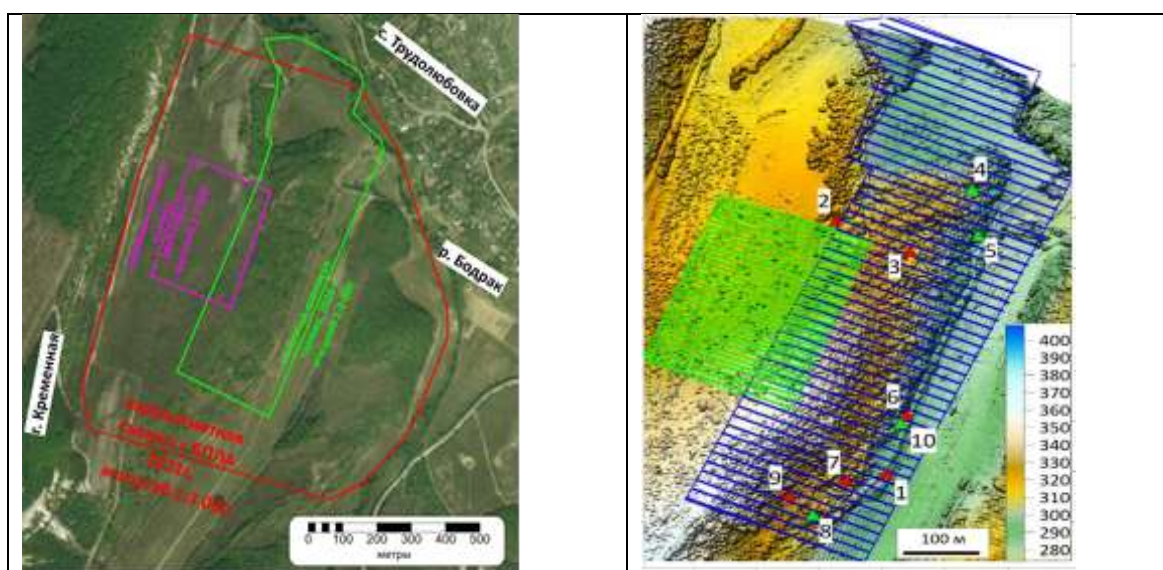


Рис. 1: Слева - контуры наземных и аэромагнитных исследований С БПЛА в районе с. Трудюлюбовка Бахчисарайского района в Крым; справа - площадь наземных магнитных исследований с обозначением мест отбора палеомагнитной коллекции магматических тел.

Площадь работ составила около 1 кв. км в масштабе 1:3 000, что значительно превышает площадь регулярных наземных исследований в этом районе. Работы выполнялись на постоянной барометрической высоте при перепадах высот рельефа до 100 метров на участке работ. Точность магнитометрических съёмок, оцененная по стандартной методике аэромагнитных работ, по секущим профилям, составила ± 1.7 нТл.

На представленной карте аномального магнитного поля (рис. 2а) на северо-востоке участка работ проявляется обширная положительная аномальная зона амплитудой до 200 нТл, отождествляемая с присутствием интрузивного комплекса. При этом, на юго-востоке область спокойного слабо отрицательного магнитного поля отражает развитие немагнитных пород таврической свиты. Для выделения эффектов приповерхностных магматических тел, изучаемых в ходе студенческой геологической практики, и местами имеющих выходы на поверхность, было произведено традиционное разделение полей на региональную (рис. 2с)

и локальную (рис. 2b) составляющие магнитного поля в пределах участка аэромагнитной съемки. На локальной компоненте магнитного поля проявляются три ярко выраженных линейные аномалии северо-восточного простирания шириной в первые десятки, а длиной в первые сотни метров. Самая южная и самая северная из них имеют амплитуду до 30-40 нТл и незначительный сопряженный минимум. В зоне распространения южной аномалии имеются выходы интрузивного тела на поверхность, имеющего название «силл Короновского», который был изучен наземной магнитной съемкой. Центральная линейная аномалия на карте имеет амплитуду до 200 нТл и сопряженный минимум значительной амплитуды, что позволяет предполагать у интрузивного тела другой петрофизический состав и морфологию, что подтверждено в ходе палеомагнитных исследований [2]. На рис. 1 приведены места отбора образцов, обозначенные на карте цифрового рельефа, снятые с БПЛА. Сопоставление данных аэромагнитных и наземных работ (рис. 2d) при значительном повторении структуры магнитного поля, позволяет предположить более сложное строение северного интрузивного тела, по всей видимости, разбитого разломным нарушением на две части северо-восточную и юго-западную, имеющие различную морфологию магнитного поля по наземным данным.

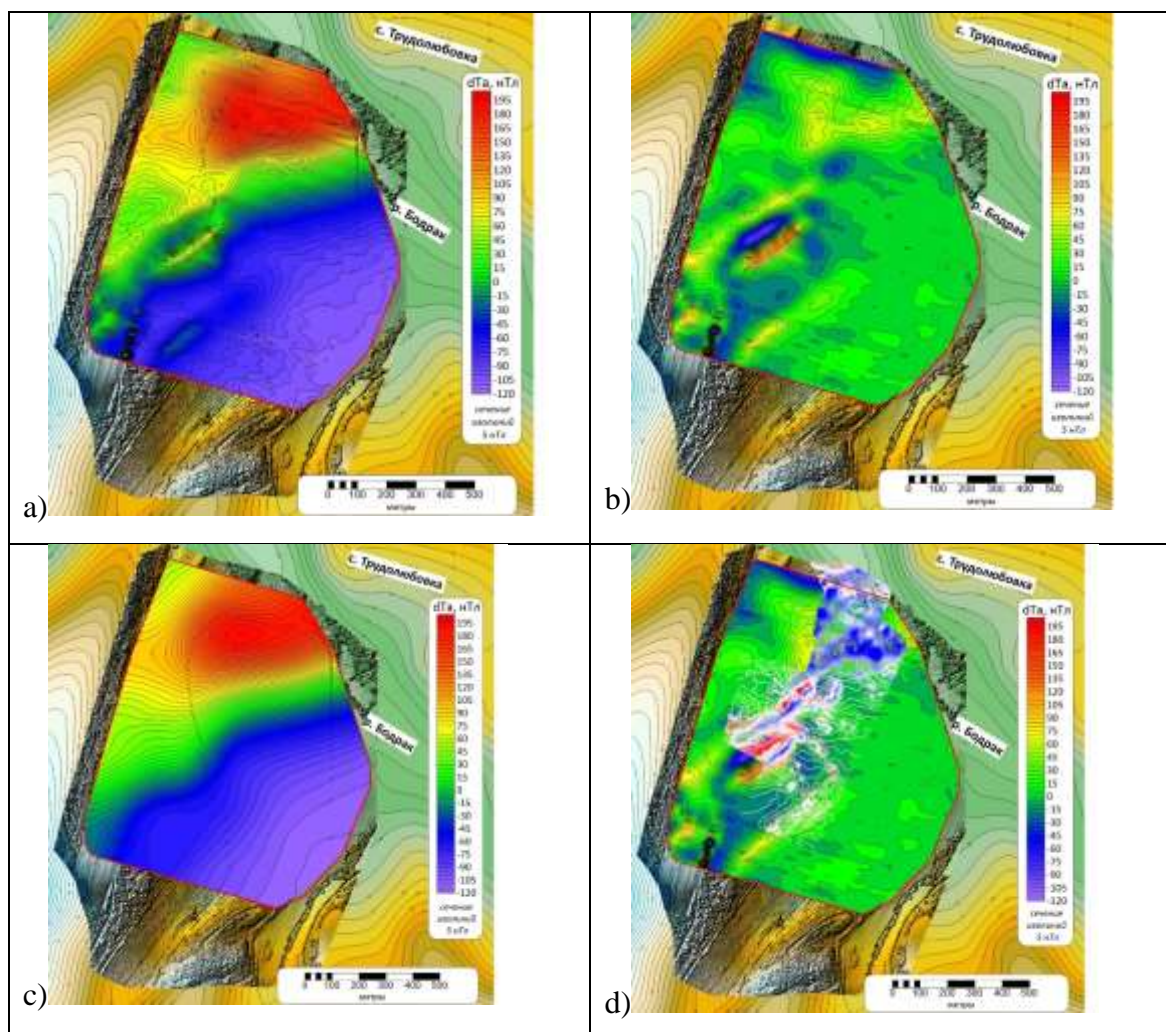


Рис. 2. Результаты беспилотной аэромагнитной съемки в районе Труdolюбовки: а) Аномальное магнитное поле, б) Локальная составляющая магнитного поля, в) Региональная составляющая магнитного поля, д) Сопоставление результатов наземных и аэромагнитометрических работ

Проведенные аэромагнитные исследования с использованием БПЛА в районе учебной практики показали высокую эффективность их применения для решения геологических задач по выявлению и картированию магматических образований в Горном Крыму, что открывает для них большую перспективу. Кроме того, освоение студентами методических навыков по маловысотной аэромагнитной съемке с БПЛА создает основу для формирования специалистов нового поколения.

Совсем иная задача решалась в ходе учебно-производственной практики на полигоне Александровской базы учебных геофизических практик в Калужской области. Геологическое строение в районе имеет платформенный тип с немагнитным осадочным чехлом мощностью до 1 км. Региональное магнитное поле (рис. 3) определяется расположенной к северу от участка работ Темкинской структурной зоной фундамента.

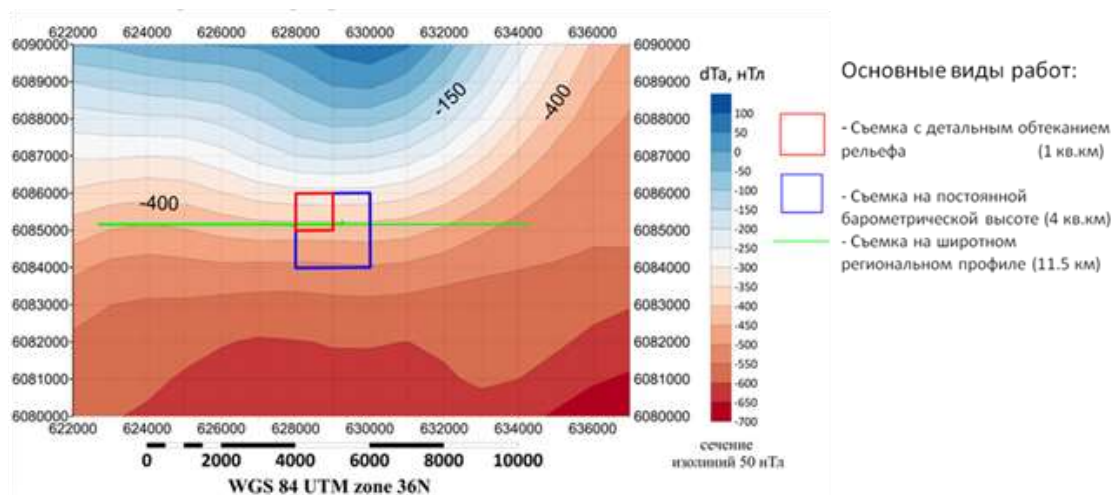


Рис. 3. Региональная аэромагнитная карта масштаба 1:200 000 с обозначением положения площади беспилотных аэромагнитных наблюдений.

В ходе учебных практик здесь были выполнены задачи уточнения структуры регионального магнитного поля на протяженном профиле длиной 12 километров и площадные аэромагнитные работы на высоте 60 метров в масштабе 1:5 000. Достаточно крупный для региона масштаб работ был выбран с целью детального изучения магнитного поля в попытке обнаружить локальные геологические объекты, характеризующиеся незначительными приповерхностными неоднородностями магнитных свойств, иногда встречающиеся в Калужской области.

На рис. 4 приведен сравнительный анализ значений магнитного поля вдоль широтного регионального профиля по данным съемки 1:200000 и результатам беспилотной

аэромагнитной съемки масштаба 1:5000. Можно сделать вывод, что существенное расхождение в амплитудах аномального поля до 200 нТл на участке 7 км, создает перспективы для уточнения региональной структуры магнитного поля по регулярной сети в масштабе не меньше 1:25 000.

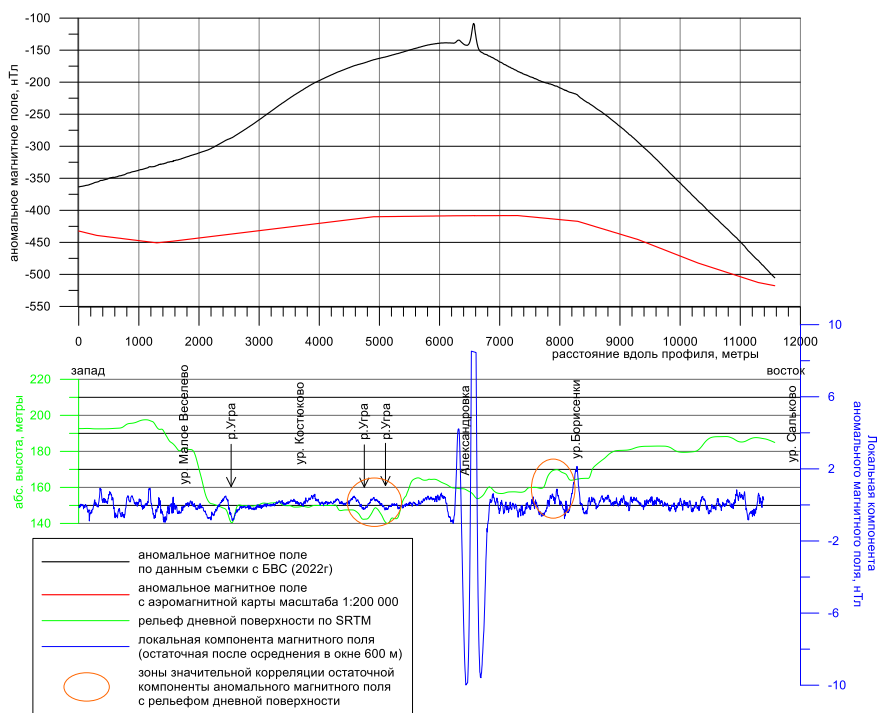


Рис. 4. Сопоставление фондовых аэромагнитных данных и результатов беспилотных измерений вдоль широтного профиля.

На графике локальной компоненты магнитного поля (рис. 4) наблюдается положительная корреляция с рельефом дневной поверхности, что позволяет предположить наличие в верхней части разреза слабомагнитных осадочных пород. Особый интерес представляет на графике небольшая (до 2 нТл) аномалия магнитного поля в районе ур. Борисенки. По данным предшествующих исследований известно [3], что она связана с наличием палеодолины, которая была откартирована по данным наземной магнитной съемки масштаба 1:2000 и подтверждена данными электроразведки. Это дает основание считать, что при решении инженерно-геологических задач по картированию палеодолин можно успешно применять маловысотную аэромагнитную съёмку с использованием БПЛА.

Еще один пример аэромагнитных результатов приведен на рис. 5. На карте аномального магнитного поля масштаба 1:5 000 (рис. 5а) зафиксирован градиент магнитного поля в северном направлении до 200 нТл/км, однако по сравнению с имеющимися фондовыми материалами (рис. 3), форма изолиний значительно отличается от линейной, что также приводит к выводу о необходимости выполнения уточняющей магнитной съемки на большей территории. По результатам выделения локальной компоненты магнитного поля (рис. 5б)

выделяются две группы локальных аномалий амплитудой до 20 нТл источниками которых являются строения двух населенных пунктов (д. Александровка и д. Малое устье).

Кроме этих аномалий, на локальной компоненте можно отметить только концентрические изолинии вокруг центра участка работ, что можно объяснить артефактами трансформации пересчета в верхнее полупространство при выделении локальной компоненты.

а)

б)

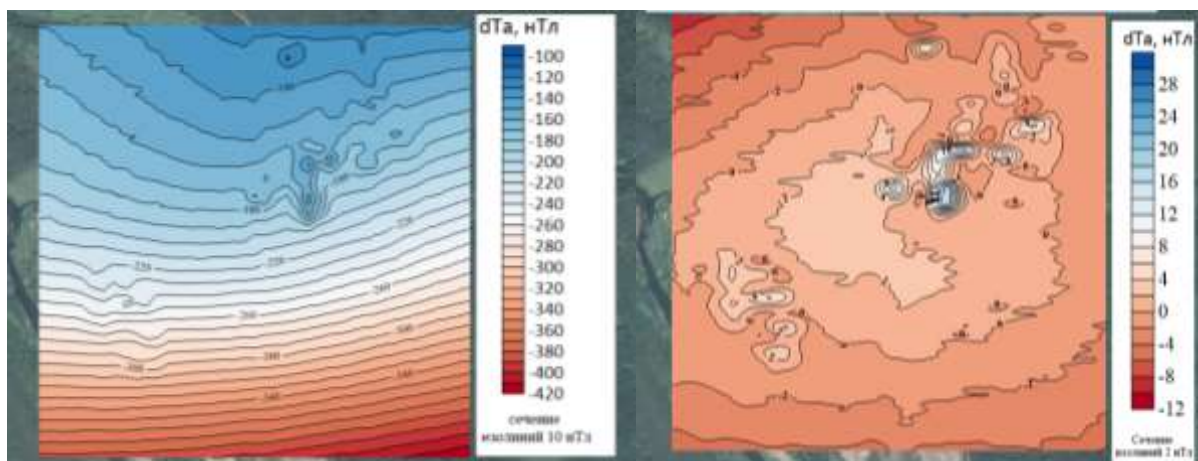


Рис. 5. Результаты беспилотных аэромагнитных работ на площади 4 кв. км: а) карта аномального магнитного поля, б) локальная компонента магнитного поля.

Подводя итог проведенным экспериментальным аэромагнитным исследованиям с использованием беспилотных летательных аппаратов, можно сделать однозначный вывод, что эта технология может успешно применяться как для решения региональных геологических задач, так и для инженерно-геологических задач по изучению палеодолин.

Литература:

1. Паршин А.В., Цирель В.С., Ржевская А.К. Методические рекомендации по выполнению маловысотной аэромагнитной съемки. Роснедра, 2018.
2. Золотая Л.А., Коснырева М.В., Паленов А.Ю., Филиппович А.В. Комплексирование данных площадных магнитных и палеомагнитных исследований в Крыму для уточнения геологического строения интрузий бодракской свиты средней юры // Геофизика. 2020. №1. С. 73-81.
3. Куликов В. А., Амбросимова М.И., Бобачев А.А. и др. Строение погребенной долины в урочище Борисенки (Юхновский район, Калужская область) по результатам комплексных геофизических работ // Инженерные изыскания. 2015. № 4. С. 42–55.

ИЗУЧЕНИЕ ПОЧТОВСКОЙ МАГНИТНОЙ АНОМАЛИИ ПО МАТЕРИАЛАМ ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

А.В. Филиппович, Л.А. Золотая, М.В. Коснырева

Магматические тела бодракского субвулканического комплекса Крыма более двухсот лет привлекают внимание геологов. Анализ ретроспективных геологических и геофизических материалов в пределах зоны сочленения равнинного и Горного Крыма показал большое количество дискуссионных вопросов, касающихся геотектонической истории формирования магматических образований. На основании анализа ретроспективных региональных комплексных геолого-геофизических материалов учеными выделяется мезозойская Предгорная сутура, отличительной особенностью которой является примыкающая к ней изометричная магматическая интрузия (так называемая Почтовская аномалия), диаметром 16 км, ярко выраженная в магнитном (амплитуда 800 нТл) и гравитационном (амплитуда 60 мГал) полях, (рис. 1).

Первые гравимагнитные исследования Почтовской аномалии были выполнены в середине 90-ых годов [1]. В этих материалах приведены результаты интерпретации гравитационных и магнитных съемок масштаба 1:50000, которые позднее были переинтерпретированы другими исследователями [2]. Авторами доклада были проанализированы материалы предшествующих исследований и дополнительно собраны материалы по профильным сейсмическим [1], электроразведочным работам [3], а также скважинные данные по петрографии, измерениям магнитной восприимчивости и остаточной намагниченности в интервале глубин от 816 м до 973 м. Отметим, что скважина №18, положение которой указано на рис. 1, была пробурена в главный магнитный максимум Почтовской аномалии.

#	Воз-раст	Инт. отбора керна, м.	Полевое описание породы	α $n \cdot 10^{-5}$ ед. СИ	J_n , $n \cdot 10^{-3}$ А/м
1	P2	0-356	Глина	<10	<10
2	P1	356-468	Песчаник	<10	<10
3	K1-2	468-702	Мергель	<10	<10
4	K1-2	702-772	Известняк	<10	<10
5	?	876-887	Катаклазиты по диоритам	5800	330
6	?	887-897	Катаклазиты по диоритам	9100	575
7	?	929-933	Кварцевый диорит	6500	580
8	?	933-943	Кварцевый диорит	8800	760
9	?	943-953	Кварцевый диорит	6300	264
10	?	953-973	Диорит	8200	970

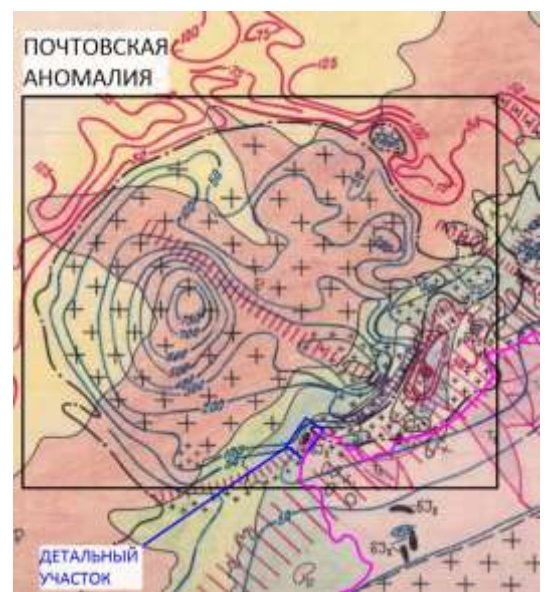


Рис. 1. Таблица магнитных свойств по скважине 18 и проявление Почтовской аномалии в магнитном поле с сопоставлением с тектонической схемой района. Зеленой линией обозначен профиль моделирования.

На начальном этапе изучения Почтовской магнитной аномалии были выполнены различные процедуры трансформаций магнитного поля в программе КОСКАД-3Д (Петров А.В.) с целью разделения его на региональную и локальную составляющие, а также многопризнаковые пространственные классификации (рис. 2).

На следующем этапе было выполнено построение двухмерных моделей по линии профиля АБ. Материалы первого этапа позволили использовать магнитные характеристики пробуренного интрузивного тела. По этим данным в модели отражено сложное строение верхней части интрузивного тела, которое представляет собой сложно-построенную полосчатую структуру, вертикальные мощности отдельных пропластов варьируют от 4 м до 20 м, а намагниченность изменяется от 2.4 А/м до 4.0 А/м.

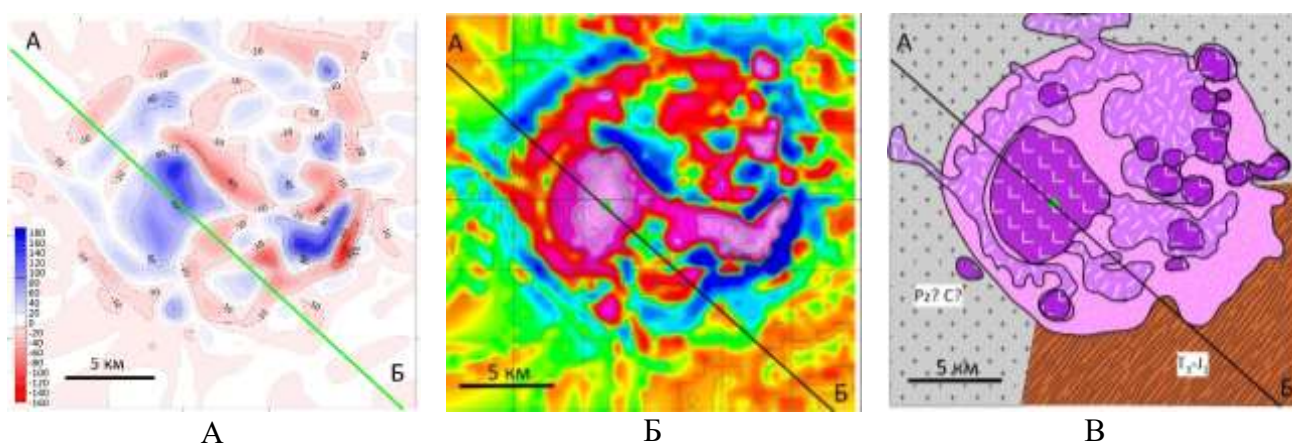


Рис. 2. Локальная составляющая магнитного поля (А), его вертикальная производная dZ (Б) и геолого-тектоническая схема (В). Линией отмечено положение профиля моделирования АБ.

Изученные магнитные свойства интрузивного тела, формирующего Почтовскую аномалию, позволяют авторам доклада сделать важный вывод о сложности и многофазности процесса формирования магматического комплекса, что дополнительно подтверждается данными геохимического анализа. Используя этот результат можно с уверенностью предположить, что магматические образования, обнажающиеся в периферийной части Почтовской аномалии, формировались из магмы различного состава, отвечающего различным глубинным уровням.

По результатам магнитного моделирования по профилю АБ (рис. 3), с опорой на имеющуюся априорную информацию, установлена сложная структура этого уникального объекта, верхняя кромка которого определена на глубине 816 м.

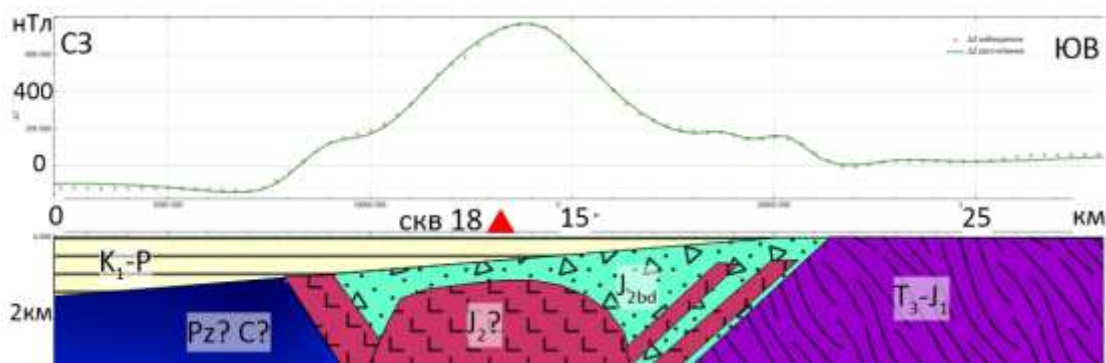


Рис 3. Результат геологической интерпретации магнитной модели по профилю АБ.

Проведенные расчеты показали, что горизонтальная мощность основного интрузивного тела составляет 6 км. По периферии от центрального тела построены отводящие каналы, по которым происходило внедрение маломощных магматических тел с северо-западной и юго-восточной сторон под углом 45-60°. Верхние кромки полученной магнитной модели хорошо согласуются с данными по скважине №18. В северо-западной части разреза располагаются немагнитные мел-палеогеновые отложения, мощность которых варьирует от 772 в центре аномалии и достигает на северо-западном участке 1800 м. Сложно-построенная модель магматического тела, отвечающего Почтовской магнитной аномалии, хорошо согласуется с моделью вулкана центрального типа, опубликованной Никишиным А.М. [5].

На завершающем этапе впервые была построена трехмерная магнитная модель Почтовской аномалии в программе MagInv3D (Чепиго Л.С.), в которой отражено сложное строение изучаемого магматического тела, относящегося к бодракскому субвулканическому комплексу средней юры (рис. 4), не нашедшему отражения на геологической карте.

Полученные результаты открывают новые перспективы по изучению магматических пород бодракского субвулканического комплекса геофизическими методами, что может внести существенный вклад в изучение на современном этапе геологии и тектоники Крымского полуострова.

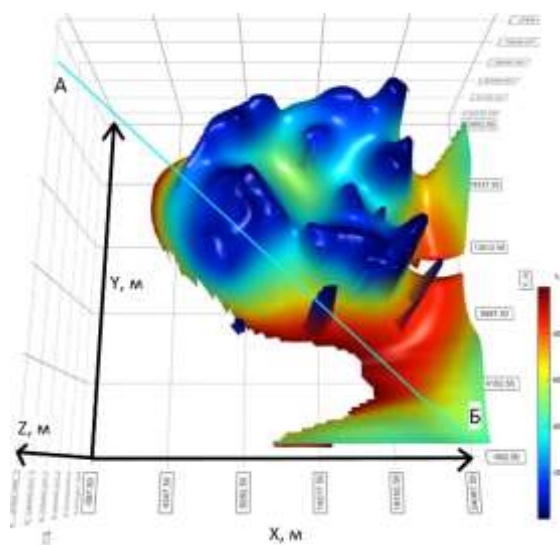
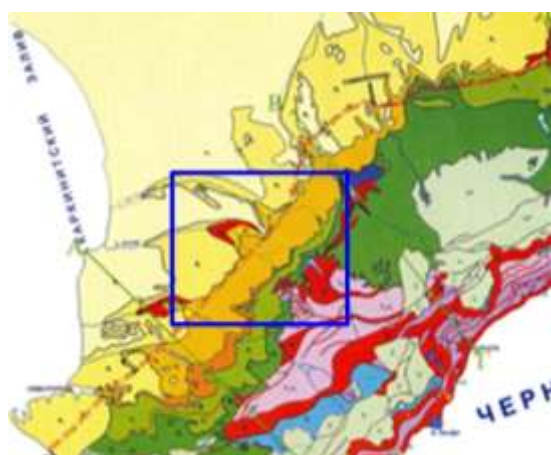


Рис. 4 А) Фрагмент геологической карты масштаба 1:500000; Б) Трехмерная модель Почтовской магнитной аномалии.

Литература:

1. Рыбаков В.Н. и др. Отчет о глубинном прогнозно-геодинамическом картировании масштаба 1:500000 территории Крымского полуострова и прилегающих акваторий в пределах листа L-36. КрымГеология. 1999.
2. Ентин В.А. и др. Ещё раз о природе Крымской гравитационной аномалии. Геофизический журнал № 6, Т. 32, 2010.
3. Десятов Д.О. и др. Магнитотеллурические зондирования на профиле Ялта – Новоселовка в Крыму. Журнал «Геофизика». № 1, 2019
4. Филиппович А.В., Золотая Л.А. Анализ ретроспективных геолого-геофизических материалов при изучении магматических пород бодракского субвулканического комплекса Крыма. Журнал «Геофизика» №6, 2021.
5. Никишин А.М. др. Геологическая история Бахчисарайского района Крыма (учебное пособие по Крымской практике). М.: изд-во МГУ, 2006.

КОМПЛЕКСНЫЕ ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ПОИСКИ ФУНДАМЕНТА ДРЕВНЕГРЕЧЕСКОЙ БАЗИЛИКИ НА БОРИСОГЛЕБСКОМ ГРЯЗЕВОМ ВУЛКАНЕ

И.Н.Модин^{1*}, В.А.Шевченко¹, А.Д.Скобелев¹, А.Д.Приходько¹, Е.Ю. Гиренко²

МГУ имени М.В. Ломоносова, геологический факультет: 1-кафедра геофизических методов исследования земной коры. 2- кафедра сейсмометрии и геоакустики

Введение

На Борисоглебском грязевом вулкане (п-ов Тамань) с целью поиска оснований древнегреческих сооружений проведены геофизические исследования методами электрической томографии, магниторазведки и сейсморазведки. Работы были выполнены в конце июня 2021 г. геофизическим отрядом лаборатории малоглубинной геофизики кафедры геофизики Геологического факультета МГУ. Сеть наблюдений состояла из серии профилей, которые располагались на расстоянии 1 метр друг от друга. Шаг между точками наблюдения составлял 1 м (рис. 1). Топографическая привязка пунктов наблюдений выполнялась непосредственно при проведении полевых работ с помощью GPS приемника типа RTK. Точность привязки составила ± 10 см. Участок работ привязан относительно пикетов, закрепленных предыдущими геофизиками-исследователями, выполнявшими георадарную съемку.

Методика геофизических работ

Основной объем работ выполняется с помощью электротомографии [1]. Наблюдения методом электрической томографии выполнены с помощью электроразведочной станции Омега-48 (ООО «Логис», г. Раменское). При измерениях на профилях использовались две 24-х электродных косы с шагом между электродами 1 метр. Длина одной расстановки при шаге между электродами 1 м составила 47 метров. Перекрытия отдельных расстановок в сводных профилях составляло 50%. Наблюдения выполнены симметричной четырехэлектродной и комбинированной трехэлектродной установкой $Amn+mnB$.

Измерения выполнялись с напряжением на выходе генератора 100-300 В. Сила тока в питающей линии достигала значений от 20-50 до 700-800 мА. Форма тока генератора – разнополярные прямоугольные импульсы с паузами, длительность импульсов и пауз между ними 200 мс. Регистрация сигналов в приемных линиях выполнялась с 4 накоплениями.

На каждой расстановке проводился контроль переходных сопротивлений. Условия заземления электродов в подавляющем большинстве случаев были благоприятными за счет вмещающих глин и переходные сопротивления не превышали 3 кОм. Средняя относительная погрешность измерений составила 1.5-2%. Благодаря выбранной методике, гарантированная глубинность измерений составила 10-15 м.

Для сейсморазведки методом преломленных волн (МПВ) использовалась 48- канальная цифровая сейсморазведочная станция ЭЛЛИСС-3 и две сейсморазведочные косы с шагом между

разъемами 2 м на 24 канала каждая. Перед началом измерений на каждой раскладке сейсморазведочных кос производился контроль качества подключения геофонов и определялся уровень шума. Были выполнены сейсморазведочные работы методом преломленных волн (МПВ). Для этого была выбрана следующая методика [2]: Пункты приема (ПП) располагаются каждые два метра; количество ПП на одной косе 24; измерения производились на двух типах волн: продольных (Р-волны) и поперечных (S-волны); Р-волны возбуждались путем вертикального удара кувалдой весом 4.5 кг по деревянному стержню. На каждом пункте возбуждения (ПВ) производилось от 10 до 20 накоплений (ударов) в зависимости от зашумленности (ветер, дождь и т.п.); S-волны возбуждались путем горизонтального удара кувалдой по наклонному стержню. На каждом ПВ производится от 7 до 15 ударов с одной стороны и от 7 до 15 ударов с другой стороны стержня. По двум профилям длиной 94 м общая длина одной расстановки составляла также 94 метра.

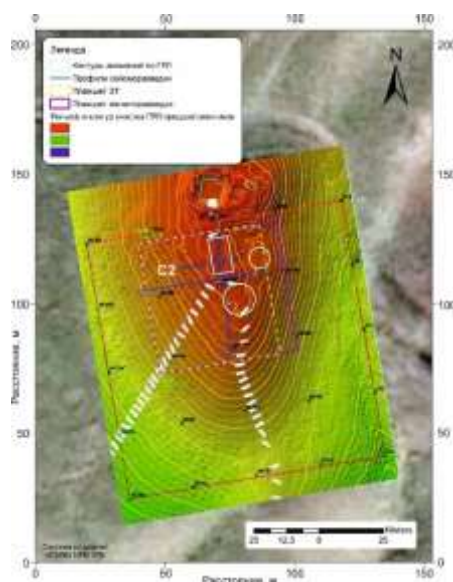


Рис. 1. Схема участка геофизических работ (C2 – сейсморазведочный профиль 2).

Наблюдения производились вдоль длинных профилей с шагом по пунктам возбуждения 2 м. По профилю длиной 47 м расстояние между геофонами составило 1 м. Минимальное удаление источник-приемник составляет 2 м, максимальный 47 м, что обеспечивает максимальную глубину исследования около 10-12.5 м. Параметры регистрации сейсмических волн: шаг дискретизации 0.5 мс, длина записи составила 512 мс.

Привязка сейсморазведочных профилей осуществлялась по пикетажу профилей, пройденных электроразведкой.

Методика обработки и интерпретации данных сейсморазведки МПВ происходила в несколько этапов: 1. предварительная обработка полевых сейсмических записей; 2. оцифровка первых вступлений преломленных волн и создание систем наблюдаемых годографов; 3. вычисление сейсмических разрезов.

Результаты исследований

Анализ полученных разрезов скоростей продольных и поперечных волн [3] указывает на наличие трех зон, которые различаются по физико-механическим свойствам (рис. 2). Первая зона располагается от ПК 17 до ПК 21, вторая зона от ПК 21 до ПК 28 и третья зона от ПК 28 ПК 34.

Повышенными упругими свойствами обладают две крайние зоны, в которых скорость поперечных волн сравнительно высокая, а скорость продольных волн небольшая (рис. 4). В середине профиля наблюдений наблюдается обратная картина – скорости продольных волн возрастают, а скорость поперечных уменьшается. Если сопоставить этот результат с магнитной аномалией, то как раз средняя зона по сейсморазведке попадает на максимум магнитного поля, а две крайние боковые зоны на минимумы магнитного поля (рис. 6). Примерно такая же картина наблюдается по срезам геоэлектрического разреза на глубине 159 см. Можно сделать вывод, что все три поля – магнитное, упругих свойств и электрических свойств в плане совпадают друг с другом. Таким образом в центре участка расположена аномальная зона, вытянутая в меридиональном направлении. Для этой аномалии высокие значения электрических сопротивлений соответствуют повышенным значениям магнитного поля (рис. 3), повышенным скоростям продольных волн и пониженным скоростям поперечных волн. На основании сочетания таких свойств можно предположить, что основание храма могло быть выполнено не из известняка, а, например, из обожженного глинистого материала или это следы обгоревшей черепицы.

Магниторазведочные наблюдения выполнялись вдоль профилей с шагом 5 м. Привязка точек наблюдения осуществлялась при помощи GPS-приёмников типа RTK, что обеспечило очень высокую точность привязки точек наблюдения. При этом оператор предварительно расставлял по краям планшета колышки, обозначающие края профилей, а сам старался идти со средним шагом 1 м и не отклоняться от профиля наблюдений. Такая методика обеспечила высокую производительность и инструментальную точность съемки. Работы на выполнены с помощью двух портативных протонных магнитометров Минимаг. При этом один из них использовался как автономная магнитовариационная станция, второй магнитометр - для осуществления рядовой профильной съемки. Общее число точек наблюдения рядовых измерений составило 2600. Точность наблюдений по результатам расчетов составила около ± 0.5 нТл.

Аномальное магнитное поле представлено на рисунке 3. На карте аномалий ΔT_a весь планшет съемки четко разделяется на два участка, которые расположены в северной и южной частях планшета. Граница между ними проходит примерно посередине. Южная часть участка характеризуется малоамплитудными бесформенными аномалиями, которые в плане не образуют четко выраженных структур. Северная часть, напротив, имеет систему аномалий, которые расположены под прямым углом друг к другу и, весьма вероятно, являются отражением

строительных конструкций. Можно отметить, что размеры прямоугольника 1, расположенного в средней части северного участка, соответствуют 10 м с севера на юг и ровно 15 м с запада на восток.

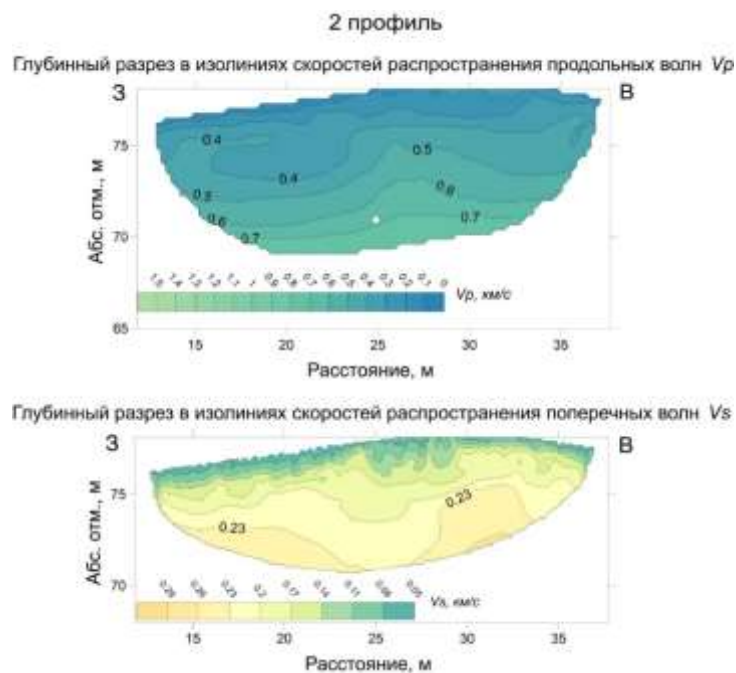


Рис.2. Результаты сейсморазведочных работ по профилю 2. Глубинные разрезы в изолиниях скорости распространения продольных (вверху) и поперечных сейсмических волн.

Такие соотношения очень близки к пропорциям храмов, которые историки называют простиль, а широтная ориентация является наиболее типичной для классических сооружений [4] (слово «ориентация» произошло от французского словосочетания «направление на восток»). Это всего лишь рабочая версия, которая обязательно должна быть проверена раскопками.

В результате обработки и интерпретации данных электротомографии [5] были построены карты срезов на десяти глубинах. Из всех данных были выбраны три наиболее информативные глубины: 46 см (поверхностный слой), 95 см (средний, наиболее вероятный слой заглубления фундаментов) и 159 см как слой максимально возможного заглубления фундаментов основания стен. Все три структурных плана на разных глубинах отличаются друг от друга. Срез на глубине 21 см лучше всего соответствует данным георадиолокации (рис. 4). Для простоты сравнения с результатами георадиолокации мы поместили аномалии ГРЛ на срезы геоэлектрического разреза, полученного по результатам электротомографии. Особое внимание было обращено на высокоомные аномалии, так как грязевой вулкан выбрасывает из себя в основном проводящие глины. Фоновые значения сопротивлений вмещающих грунтов типичны для геологических построек такого типа и составляют 1.5 – 2 Ом·м. На участке работ выявлены аномалии высокого сопротивления, которые достигают 30 Ом·м, что более чем на порядок превосходит значения фона. Прямоугольник, выделенный по результатам георадиолокационной съемки, хорошо

соответствует проводящим аномалиям удельного сопротивления (особенно на глубине 95 см). Круговые аномалии плохо соответствуют данным электротомографии. Срезы геоэлектрического разреза на глубине 46 см указывают на то, что возможный источник аномального поля располагается западнее «георадарного прямоугольника». На глубинах 46 и 95 см размеры объекта действительно не очень большие и меньше, чем требуемый размер фундамента храма.

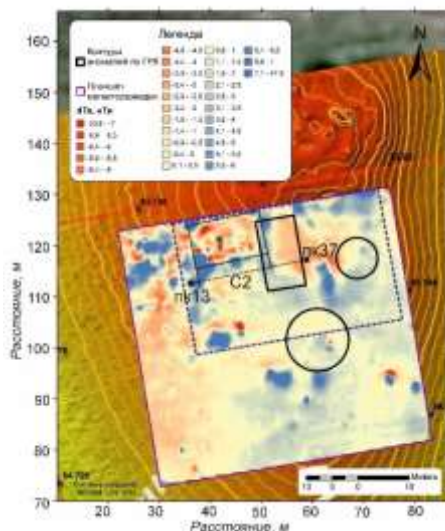


Рис. 3. Аномальное магнитное поле на участке работ (красным цветом показаны отрицательные аномалии магнитного поля, а синим цветом - положительные).

Однако структура аномалий имеет правильную прямоугольную форму. А на глубине 159 см структура аномалий меняется и ширина аномалий становится около 20 м, а длина с юга на север около 30 м. На глубине 213 см прослеживается прямоугольник длиной порядка 25-30 м с юга на север и шириной около 15 м с запада на восток.

Аномалии электрического поля хорошо ложатся на магнитное поле. Магнитное поле над известняками должно быть меньше магнитного поля над глинами (известняки практически немагнитны и не обладают избыточной намагниченностью). Однако в данном случае линейные объекты типа стен однозначно выделяются положительными аномалиями. Только археологические раскопки могут ответить на этот непростой вопрос. При этом высокие значения аномального магнитного поля отличаются от низких значений поля примерно на 70-80 нТл. Может быть, фундаменты сооружения были сделаны не из известняка, т.к. известняк на Таманском полуострове мог быть только экспортным материалом, или фундамент был выполнен из обожжённого материала, или фундамент обжигался во время его изготовления.

Изометричные аномалии, выделенные по результатам георадиолокации, которые на **Рисунке 6** показаны в виде двух черных кругов, практически никак не отражаются в магнитном поле. Прямоугольная аномалия определенным образом соответствует магнитной аномалии. Можно отметить еще несколько аномалий, которые с некоторой долей вероятности

складываются в определенную прямоугольную конструкцию, которая по направлениям соответствует направлениям осей аномалий георадиолокации. Результаты магниторазведки являются наиболее обнадеживающими. Комплекс линейных взаимоперпендикулярных аномалий, напоминающих сложную прямоугольную структуру, является наиболее перспективным для раскопок. Общий размер участка, который необходимо проверить раскопками, выделен на рис.6 темно-синим пунктиром и составляет 25 х40 м.

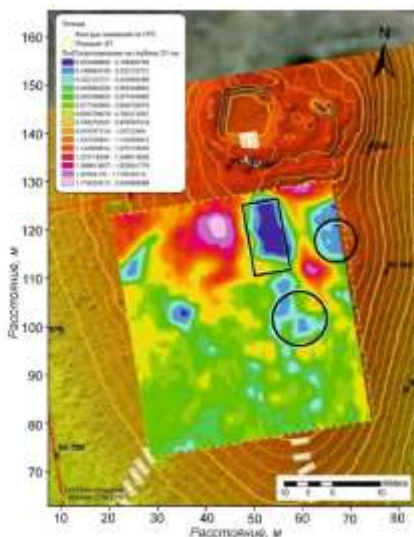


Рис. 4. Сопоставление среза геоэлектрического разреза на глубине 21 см с результатами предшествующей георадиолокационной съёмки.

Выводы

Выполненные геофизические исследования указывают на наличие аномальных зон в северной части участка работ.

1. На наш взгляд раскоп, который был выполнен несколько лет назад расположен севернее относительно искомых объектов примерно на 15 метров.

2. Южная часть участка свободна от аномалий и наш взгляд не представляет интереса для проведения археологических раскопок.

3. Структура геофизических полей в северной части участка является достаточно сложной. Но основные аномалии магниторазведки и электроразведки удовлетворительно сопоставляются друг с другом. Результаты сейсмических работ по профилю 2 показали также удовлетворительное сходство с потенциальными полями.

Благодарности

Авторы выражают благодарность археологу Института Археологии РАН Г.А. Ломтадзе за оказанную инициативу, информационную поддержку и разрешение проведения работ на памятнике, а также фирме ООО «НПЦ Геоскан» за предоставленные геофизические приборы и оборудование, заместителю директора «НПЦ Геоскан» С.А. Акуленко за техническую помощь в организации экспедиции.

Литература:

1. Бобачев А.А., Горбунов А.А., Модин И.Н., Шевнин В.А. Электротомография методом сопротивлений и вызванной поляризации // Приборы и системы разведочной геофизики. 2006. №2, с.14-17.
2. Ермаков А.П., Владов М.Л., Шмурак Д.В. Опыт применения сейсморазведки для оценки карстовой опасности // Инженерные изыскания. 2016. №5-6. с. 52-59.
3. Пийп, В.Б Локальная реконструкция сейсмического разреза по данным преломленных волн на основе однородных функций // Физика Земли. 1991. №10.
4. Поляков Е.Н. Об ориентации культовых построек древнего мира // Архитектура и градостроительство. Вестник ТГАСУ. 2004. №1, с.10-29.
5. Loke, M.H. Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys. 2009. 144 p.

ИНЖЕНЕРНО-ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРИ ИЗУЧЕНИИ ЛИНЕЙНОГО СООРУЖЕНИЯ В ЛЕНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ

И.Н. Модин^{1,2}, А.Д. Скобелев^{1,2}, Д.К. Большаков^{1,2}, М.И. Богданов³

¹-Геологический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, ²-ООО «НПЦ Геоскан»,
³-ООО «ИГИИС»

Район работ расположен на Приневской низине, на реке Ижоре (левый приток Невы). Около 500 млн лет назад в раннем кембрии на огромных территориях данной местности сформировалась мощная глинистая толща. В палеозое вся эта территория была покрыта морем. Осадочные отложения того времени преимущественно глины, известняки и песчаники покрывают толщей свыше 200 метров кристаллический фундамент, состоящий из гранитов, гнейсов и диабазов. Современный рельеф образовался в результате деятельности ледникового покрова (последнее Валдайское оледенение было 12 тысяч лет назад). После отступления ледника образовалось Литоринное море, уровень которого был на 7–9 м выше современного. 4 тысячи лет назад море отступило и образовалась долина реки Невы. Долина сложена озёрно-ледниковыми и постледниковыми отложениями. Последние 2.5 тысячи лет рельеф почти не менялся. В целом для территории района характерен полого-холмистый равнинный рельеф. Из особенностей геологического строения необходимо отметить присутствие горизонта синих глин, распространенных повсеместно. Мощность синих глин в среднем составляет 110–120 м. Глина окрашена в голубовато-серый или зеленовато-серый цвета, тонкогоризонтальнослоистая. В толще синих глин присутствуют алевроитовые прослойки. Характерным для синих глин является присутствие рассеянных кристаллов и друз пирита и марказита. Основными компонентами в глинах являются кремнезем и глинозем. Из органических остатков - редкие остатки трубчатых червей с известковистыми и хитиновыми оболочками.

Воды реки Ижора характеризуются как загрязнённые: загрязнение реки ионами металлов в 3–6 раз превышает ПДК. В Ижору через 9 стоков ежегодно попадает около 39 млн кубометров сточных вод, в основном это бытовые отходы. Анализ воды Ижоры, выполненный в мае 2008 года, показал, что ПДК для опасных веществ превышены в десятки и сотни раз; среди прочих в воде обнаружены ртуть, нефтепродукты, свинец, ацетон, хлороформ. Такие загрязнения вод могут приводить к региональному понижению удельного электрического сопротивления грунтов. Как показали наши исследования средние сопротивления грунтов включая пески не превышают 45 Ом·м. При этом результаты резистивиметрии (измерение сопротивления воды) показали, что во время наших работ вода в реке имела сопротивление 16–17 Ом·м. Именно такие сопротивления воды могут приводить к значительным понижениям удельного сопротивления грунтов. Кроме этого, очистные сооружения, расположенные в непосредственной близости от

места работ, работают по внешним проявлениям неидеально. Всё это может приводить к серьезным химическим загрязнениям верхней части разреза.

При выполнении сейсморазведочных работ использовался метод преломленных волн (МПВ), основанный на регистрации в первых вступлениях головных и рефрагированных волн. Глубинность метода составляет в данном случае около 20 м и определяется длиной волны, силой удара и контрастностью сейсмических свойств грунтов. МПВ в данном случае позволил эффективно определять мощность до глубины 20–25 м для поперечных волн и порядка 15 м для продольных волн.

В ходе электротомографических работ были выполнены профильные наблюдения методом вертикального электрического зондирования (ВЭЗ) в модификации электрической томографии (ЭТ). Электротомография является одним из ведущих методов малоглубинной электротомографии постоянным током при геофизических исследованиях верхней части геологического разреза. Всего выполнены исследования по 1 профилю общей протяженностью 357 погонных метров с шагом по профилю 5 м (рис. 1). Глубина исследования методом электротомографии составляет около 50 м. Условно по вертикали геоэлектрический разрез можно разделить на три части. Сверху мощностью в несколько метров мы видим слой сравнительно высокого сопротивления более 35 Ом·м, который соответствует пескам. Ниже залегает проводящий слой (от 5 до 15 Ом·м) суглинков и глин мощностью около 10 м. Нижнюю часть разреза занимают синие кембрийские глины с мощностью более 20 м.

Глубина исследования сейсмическим методом для поперечных волн составляет около 20–25 м. Сейсмический разрез поперечных волн имеет двухслойное строение. Сверху мощностью около 8–9 м залегает низкоскоростной слой со скоростью поперечных волн до 250 м/с. Ниже расположен слой с возрастающей скоростью от 300 до 500 м/с. Еще ниже, начиная с глубины 15–20 м, скорости поперечных волн практически не изменяются и составляют чуть более 500 м/с.

На участке, где были выполнены измерения продольных волн (рис. 1), их скорость меняется в верхнем слое изменяется от 500 до 1600 м/с. Скорость продольных волн в нижней части разреза меняется от 1700 до 2200 м/с. При этом на глубине от 7–8 до 15 м прослеживается слой с практически неизменной скоростью от 1600 до 2100 м/с. То есть комплексный скоростной разрез поперечных и продольных волн можно разделить на 3 слоя:

- верхний – градиентный слой с нарастающей вниз скоростью $V_p(h)$ с неизменной скоростью $V_s=200–250$ м/с, такое соотношение скоростей характерно для слоя, в котором

происходит увеличение плотности пород с глубиной, при этом верхняя часть разреза обладает высокой влажностью;

- средний – с практически неизменной скоростью $V_p = \text{const}$ и градиентным слоем V_s от 250 до 500 м/с, такое соотношение скоростей характерно для слоя, в котором происходит

уменьшение влажности и соответственно увеличение сцепления между частицами грунта без заметного увеличения плотности с глубиной, при этом на подошве слоя влажность выходит на асимптотически минимальную величину;

- нижний - с высокой скоростью $V_p = 2000$ м/с и $V_s = 500$ м/с, это означает что в этом слое глин уже не меняется плотность и влажность с изменением глубины.

Эта особенность скоростной модели находит хорошее отражение на разрезе V_s/V_p (рис. 1). Проведены две границы, которые довольно уверенно можно протрассировать на этом разрезе: первая граница I соответствует интервалу глубин, в котором V_s/V_p уменьшается до величины 0.15, вторая граница II – проведена по линии максимального значения V_s/V_p . Ниже скорости меняются мало.

Немногочисленные данные показывают в целом уменьшение скорости поперечных волн с ростом влажности, также это вполне согласуется с представлениями о распространении поперечных волн (волн «сдвига») в дисперсных грунтах. Хорошо известно, что сдвиговые характеристики глинистых грунтов существенно зависят от влажности и с ростом последней значительно снижаются.

В результате выполненных инженерно-геофизических исследований можно сделать следующие выводы.

I. По основным физическим свойствам можно выделить 3 комплекса грунтов:

1) Верхний комплекс включает в себя три литологических толщи: самая верхняя – пески техногенного и естественного (ледникового и речного) происхождения. Вторая толща – моренные суглинки. Третья толща – глины синие дислоцированные. Вся эта толща залегает на глубине от 7 до 9 м и характеризуется крайне низкими (200–250 м/с) скоростями поперечных волн. Такие низкие скорости объясняются слабым сцеплением частиц грунта и высокой обводненностью грунтового материала. С точки зрения продольных волн данный комплекс характеризуется увеличением скорости от кровли к подошве этой кровли, что свидетельствует о линейном увеличении плотности с глубиной.

2) Второй комплекс располагается на глубинах от 7–9 до 15 м. Характеризуется постоянной скоростью продольных волн (около 2 км/с) и возрастанием поперечных скоростей от кровли к подошве, что указывает на уменьшение влажности. Данный интервал глубин соответствует средней части геоэлектрического разреза, на котором отражаются изменения свойств синих глин.

3) Нижний комплекс грунтов: скорости продольных волн более 2 км/с, а скорости поперечных волн составляют от 0.3 до 0.5 км/с. Данная толща также характеризуется сильной изменчивостью удельных электрических сопротивлений. Таким образом, в пределах второй и третьей толщ выделяются зоны повышенных и пониженных сопротивлений синих глин, при этом

зоны повышенных сопротивлений соответствуют ненарушенным синим глинам в естественном залегании, а пониженные сопротивления соответствуют трещиноватым глинам.

II. Необходимо отметить, что самая верхняя часть разреза до глубины 7–9 м имеет очень низкие прочностные свойства. Рекомендуемые глубины, на которых могут быть закреплены опоры линейного сооружения – свыше 9–10 м.

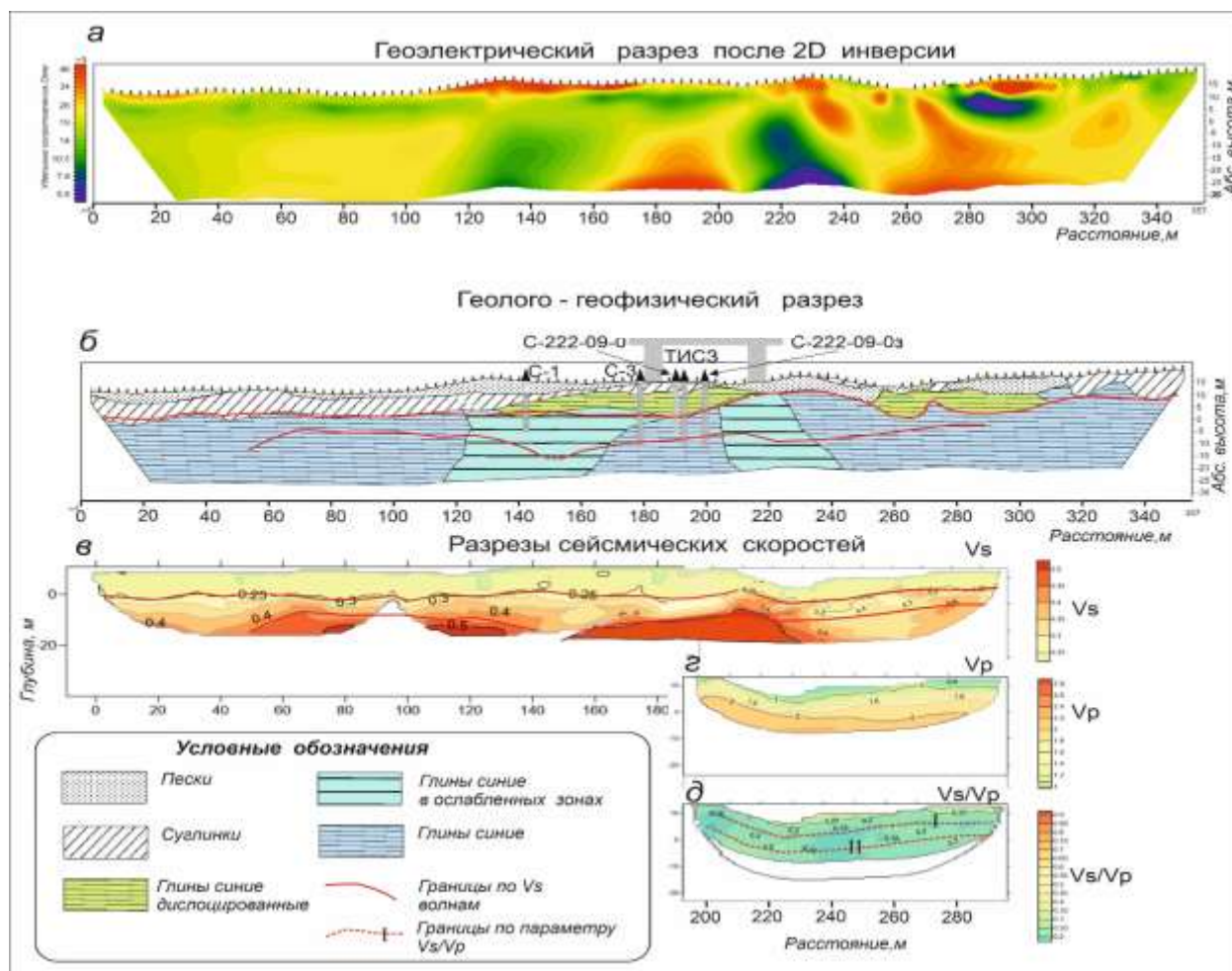


Рис. 1. - Результаты инженерно-геофизических исследований: **а**- геоэлектрический разрез, **б** – комплексный геолого-геофизический разрез, **в** – глубинный разрез в изолиниях скорости распространения поперечных сейсмических волн, **г** - глубинный разрез в изолиниях скорости распространения продольных сейсмических волн, **д** – глубинный разрез в изолиниях параметра отношения скорости поперечных к скорости продольных сейсмических волн.