

ПОИСКИ БОКСИТОВ НА ВОСТОЧНОМ СКЛОНЕ БАЛТИЙСКОГО ПИТА ГЕОФИЗИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

Г.П.НОВИЦКИЙ, В.А.КАЦЕВ

Одной из основных трудностей, с которыми встречаются исследователи при поисковых работах геофизическими методами на бокситы в Североонезском бокситоносном районе, является слабое различие пород осадочной толщи по физическим свойствам. Промышленные залежи бокситов встречены здесь в нижнем карбоне. Они представлены пластами бокситов осадочного происхождения, локализованными в пониженных частях докарбонового рельефа вблизи выступов пород основного состава в кристаллическом фундаменте. Каменноугольная система представлена песчано-глинистыми и карбонатными отложениями всех трех отделов. Подстилает нижнекарбоновые отложения песчано-глинистые осадки нижнего кембрия и верхнего девона. Работами, проводившимися Западным геофизическим трестом (ЗГТ) в 50-х годах, показано, что рельеф докарбоновой поверхности в сглаженной форме повторяет рельеф фундамента. Такая унаследованность форм рельефа позволила проводить поисковые геофизические работы посредством картирования поверхности кристаллического фундамента, являющегося очень четкой границей раздела. В результате геолого-геофизических работ открыто несколько крупных месторождений бокситов.

В постановке геофизических исследований была намечена определенная очередность работ:

- 1) региональная гравитационная и магнитная съемки, направленные на общее изучение форм рельефа докембрийского фундамента, тектоники и состава пород восточного склона Балтийского пита;
- 2) электроразведочные работы методом ВЭЗ для выделения крупных форм рельефа кристаллического фундамента первого и второго порядков;
- 3) сейсморазведочные работы для выделения более мелких депрессий третьего порядка, перспективных на постановку буровых работ с целью поисков месторождений бокситов.

Два первых этапа геофизических исследований выполнены почти на всей территории Североонежского бокситоносного района. Наряду с уже открытыми и разведанными месторождениями, выделены обширные площади, перспективные для проведения детальных сейсмических исследований. Однако в связи с сильной заболоченностью и залесенностью района, а также отсутствием подъездных путей проведение громоздких сейсмических работ весьма затруднено.

Летом 1971 г. кафедра геофизических методов разведки Ленинградского горного института и ЗГТ провели опытные электроразведочные работы методом непрерывных частотных зондирований (НЧЗ) с аппаратурой НЧЗ-64. Участок работ располагался в Плесецком районе Архангельской области.

Общая мощность палеозойских отложений на участке работ достигает 150-200 м и более. Коренные породы сплошным чехлом перекрыты четвертичными отложениями мощностью до 100 м и более. Породы кристаллического фундамента характеризуются удельным электрическим сопротивлением в сотни и тысячи ом-метров, песчано-глинистые отложения кембрия, девона и карбона - 30-100 Ом·м, карбонатные отложения верхнего палеозоя - сотни - первые тысячи ом-метров. Физические свойства четвертичных отложений близки к таковым для песчано-глинистой толщи палеозоя.

Основной объем электроразведочных работ методом НЧЗ выполнен летом на профиле протяженностью 13 км, по которому последующей зимой проведены сейсмические наблюдения. Расстояние между точками стояния генераторной группы (ГГ) станции НЧЗ-64 равнялось 1 км, между ГГ и приемной группой (ПГ) $r = 0,5; 0,7$ км, причем ПГ располагали поочередно по обе стороны от ГГ. Размер питающего диполя АВ составлял 100-200 м, приемного диполя MN - 20-40 м (при записи ΔU_{Σ}). Запись ΔU_{Σ} осуществляли с помощью квадратной петли, состоящей из трех витков изолированного провода со стороной квадрата 30 м, т.е. общей площадью петли 2700 м². Силу тока I в питающем диполе АВ и ΔU на приемном диполе MN (или в петле) непрерывно регистрировали автоматически перописцами в диапазоне частот от 70 Гц до 10 кГц в течение 4 мин. Методика полевых работ аналогична описанной ранее [2].

Типичные кривые кажущегося сопротивления НЧЗ получены в результате обработки записей (лент) электрической $\tilde{\rho}_s$ и магнитной $\tilde{\rho}_m$ составляющих поля (рис.1). На рис.1 приведены также геологические результаты сейсмо- и электроразведочных работ по части профиля III.

Рассмотрение кривых НЧЗ позволяют сделать некоторые выводы о геологическом строении вдоль профиля III. На северо-восточном конце профиля располагаются НЧЗ 3, 2, I, 4-7. Кривая $\tilde{\rho}_m$ первого из них носит двухслойный характер, а остальные отображают трехслойный геоэлектрический разрез типа А [1]. Далее, на юго-западе, из-за некоторого увеличения сопротивления первого слоя кривые типа А сменяются кривыми типа Н (НЧЗ 8, 9). Далее к юго-западу кривые типа Н сменяются кривыми типа КН (НЧЗ 10-13). Усложнение типа кривых (от Н к КН) вызвано появлением в разрезе карбонатных известняков высокого сопротивления. Далее к юго-западу мощность этих известняков увеличивается, возрастает и глубина залегания кристаллического фундамента. Указанное обстоятельство приводит к тому, что на кривой $\tilde{\rho}_s$ кристаллический фундамент не проявляется и

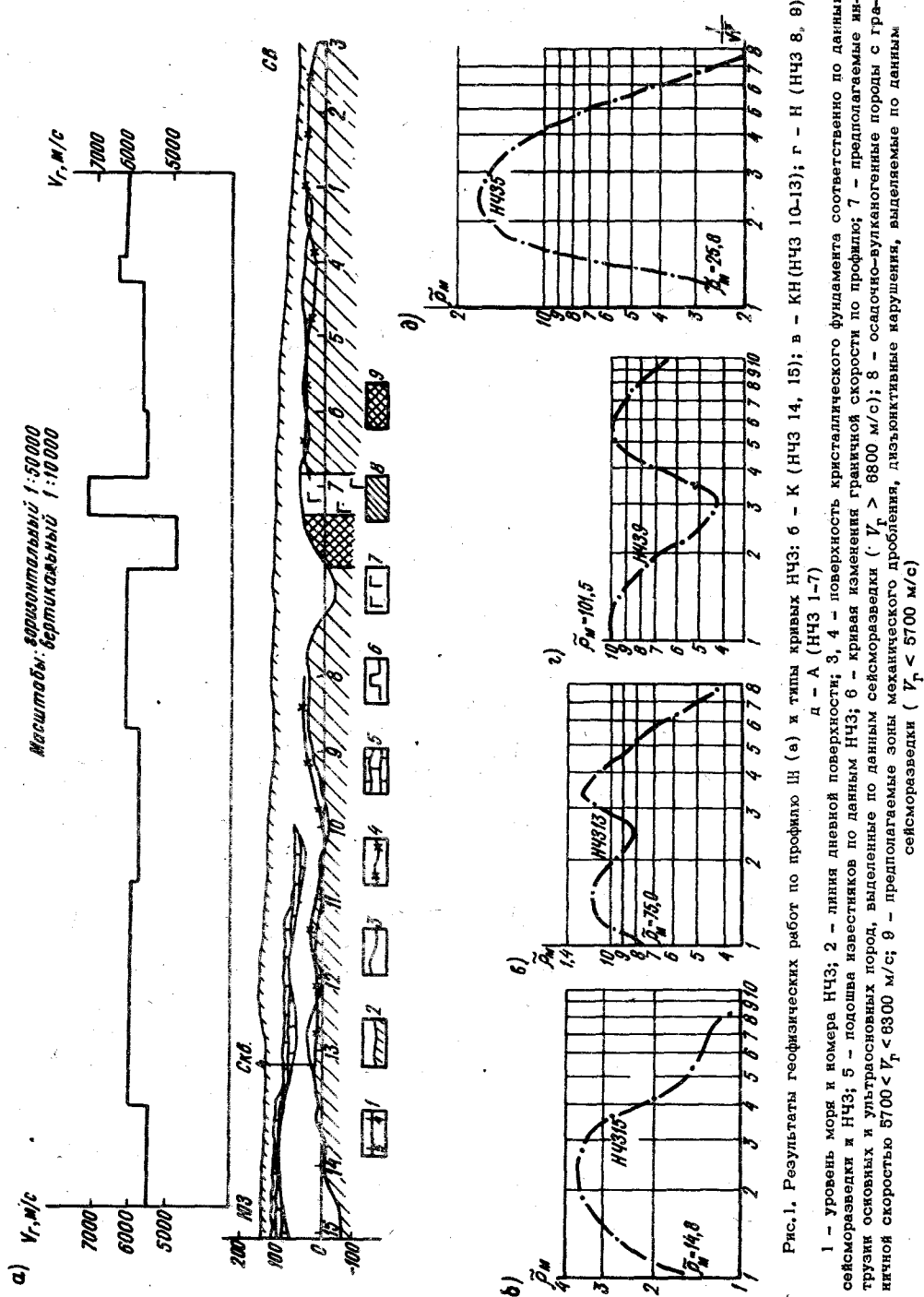


Рис.1. Результаты геофизических работ по профилю III (а) и типы кривых НЧЗ: 6 - К (НЧЗ 14, 15); в - КН (НЧЗ 10-13); г - Н (НЧЗ 8, 9); д - А (НЧЗ 1-7)

она отображает разрез типа К, а на кривой $\tilde{\rho}_m$ (НЧЗ 15) кристаллический фундамент проявляется крайне нечетко (даже при $r = 750$ м).

Мощность и сопротивления слоев разреза по кривым НЧЗ можно определить различными способами. По двухслойным кривым $\tilde{\rho}_m$ и $\tilde{\rho}_1$ мощность первого слоя находится с помощью двухслойной палетки [3]:

$$h_1 = \frac{\sqrt{10 \rho_1}}{8\sqrt{f}} \quad , \quad (1)$$

где ρ_1 — сопротивление первого слоя, Ом·м; f — частота, Гц. Определяют ρ_1 и f по положению креста двухслойной палетки.

Наиболее удобным приемом определения мощности слоев по кривым типа А является использование формул, учитывающих ряд эмпирических связей между параметрами разреза (h и ρ), разном r и координатами некоторых характерных точек кривой НЧЗ. Б.С.Эненштейн [5] приводит следующие формулы для вычисления глубины залегания слоя высокого сопротивления:

$$h = 4,59 r^{0,33} (1/\sqrt{f})_{\min}^{1,6} : \left[(10 \lg \frac{\tilde{\rho}_m}{\rho_1})^{1,59} + 3,96 \right] \rho_1^{0,17} S \quad ; \quad (2)$$

(3)

$$h = 0,51 S^2 \rho_1^{1,17} r^{0,67} : (1/\sqrt{f})_{\min}^{1,67}$$

Для вычисления h (с помощью ЭМ) берут r , при котором выполнено зондирование, и по кривой зондирования определяют S — суммарную продольную проводимость и $\tilde{\rho}$ — значение кажущегося сопротивления в точке максимума. Значение $(1/\sqrt{f})_{\min}^m$ зависит от среднего продольного сопротивления ρ_1 , принятого для обработки. Каждая из приведенных формул характеризует различные законы изменения h в зависимости от ρ_1 . Значения h , полученные по формулам (2) и (3), равны только в том случае, если ρ_1 соответствует истинному значению. Это положение справедливо для любых многослойных кривых, заканчивающихся кривыми типа А или Н, а также для двухслойных кривых типа $\rho_2 > \rho_1$ [1, 4, 5].

В качестве примера кривой типа А рассмотрим кривую $\tilde{\rho}_m$ НЧЗ 5 (рис.2). Величина $r = 0,5$ км, $\tilde{\rho}_m = 300$ Ом·м, $S = 0,72$ См/м.

Результаты обработки НЧЗ 5 следующие:

ρ_1 , Ом·м	35	41	69	83	92	110	130
$(1/\sqrt{f})_{\min}$	0,0082	0,0072	0,0078	0,0097	0,0106	0,0100	0,0110
h , км							
по формуле (2)	0,053	0,069	0,065	0,067	0,068	0,078	0,092
по формуле (3)	0,014	0,020	0,039	0,052	0,066	0,083	0,099

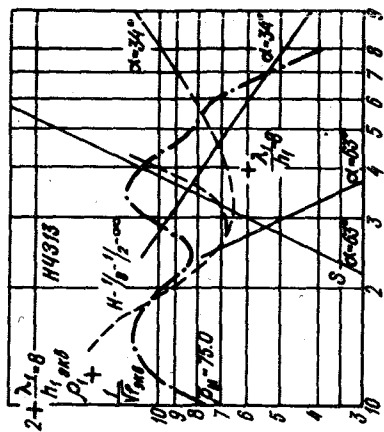
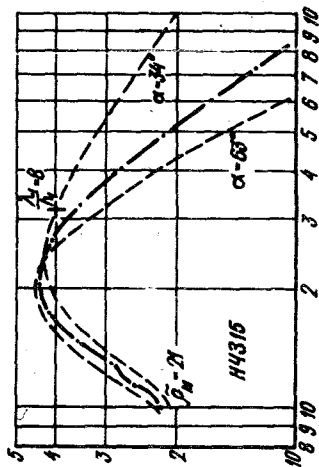


Рис.2. Примеры интерпретации кривых НЧЗ

Из этих данных видно, что близкие глубины (66 и 68 м) залегания горизонта высокого сопротивления получаются по формулам (2) и (3) при $\rho_1 = 92 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ и $(1/\sqrt{f})_{\min} = 0,0105$.

Кривые типа Н весьма удобны для вычисления $h = h_1 + h_2$, особенно если в левой части кривые выходят на асимптоту ρ_1 . Рассмотрим несколько приемов вычисления мощностей слоев по кривой $\tilde{\rho}_m$ (НЧЗ 9).

1. Учитывая, что в левой части кривая почти выходит на сопротивление первого слоя, найдем величину h_1 с помощью двухслойной палетки. По положению креста двухслойной палетки находим:

$$h_1 = \frac{\sqrt{10 \cdot \rho_1}}{8\sqrt{f}} = \frac{\sqrt{10 \cdot 90}}{8} \cdot 0,0155 = 0,057 \text{ км.}$$

2. Данная кривая $\tilde{\rho}_m$ хорошо совмещается с теоретической кривой типа Н, у которой $\mu_2 = \frac{\rho_2}{\rho_1} = 1/4$, $\mu_3 = \frac{\rho_3}{\rho_1} = \infty$ и $\nu_2 = \frac{h_2}{h_1} = 1$.
С учетом вышеизложенного $h_2 : h_1 = 1$, $h_1 = 57 \text{ м}$, $h_1 + h_2 = 114 \text{ м}$.

3. Значение $h = h_1 + h_2$ можно получить также с помощью использования двух характерных величин S и Z [5]. Величину

$$S = h : \rho_1 \quad (4)$$

определяют по самой кривой. Величина Z является абсциссой минимума кривой НЧЗ, предшествующей восходящей ветви кривой:

$$Z = \sqrt{10\rho_1} / h\sqrt{f_{\min}} \quad (5)$$

Из формул (4) и (5) находим

$$h = \frac{10}{Z^2 S f_{\min}} \quad (6)$$

$$\rho_1 = \frac{10}{Z^2 S^2 f_{\min}} \quad (7)$$

Величины h , ρ_1 и S характеризуют разрез и не зависят от r/h_1 . Величина Z увеличивается с ростом r/h_1 и определяется по специальной номограмме [4], где видна зависимость величины Z от μ_2 и ν_2 для $r/h_1 = \infty$. Для нахождения величин h и ρ_1 практическая кривая, полученная при конечном r/h_1 , трансформируется в кривую для $r/h_1 = \infty$, для чего на бланк, где вычерчена практическая кривая, наносят с палетки теоретическую кривую с $\mu_2 = 1/4$, $\nu_2 = 1$ для $r/h_1 = \infty$. Величины S и $f_{\min}$ определяют по трансформированной кривой, и тогда $f_{\min} = 850 \text{ Гц}$, $S = 503 \sqrt{1/f} = 3,5$. Определение Z для $\mu_2 = 1/4$ и $\nu_2 = 1$ дает $Z = 5,55$, и тогда $h = h_1 + h_2 = 109 \text{ м}$ и $\rho_1 = 32 \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

4. Вычисленное $h = h_1 + h_2$ по формулам (2) и (3) оказалось равным 112 м и $\rho_1 = 33 \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

Итак, различные приемы определения глубины залегания кристаллического фундамента дали весьма близкие результаты.

Мощности слоев h_1 , h_2 и h_3 по кривым типа КН вычисляют в два этапа. На первом этапе вычисляют значения h_1 и h_2 (кривая типа К). Затем два верхних горизонта заменяют одним горизонтом, им эквивалентным, и вычисляют значение h_3 по правой части кривой, т.е. кривой типа Н.

Остановимся на описании приемов вычисления $h_1 + h_2$ по кривым типа К. Если сопротивление третьего слоя в разрезе типа К равно нулю, т.е. $\rho_3 = 0$, то

$$h = h_1 + h_2 = \frac{1,14}{\sqrt{f}} \quad (8)$$

где $1/\sqrt{f}$ определяется в точке пересечения кривой (или ее продолжения) с осью $\rho_1 = 10 \text{ Ом}\cdot\text{м}$.

Если $\rho_3 \neq 0$, то такая кривая предварительно трансформируется в кривую с $\rho_3 = 0$ с тем же значением h с помощью специальной палетки. На рис.2 приведен пример определения h по кривой $\tilde{\rho}_m$ типа К (НЧЗ 15). Суммарная мощность двух верхних слоев (глубина залегания подошвы известняков) 71 м. Трансформация кривой проведена палеткой при $\mu_2 = 8$ и $\nu_2 = 4$. Кривые типа К частотных зондирований весьма благоприятны для определения h , так как на них распространяется действие принципа эквивалентности h_2 , при котором глубина залегания слоя низкого сопротивления не зависит от того, какое значение ρ_2 взято для вычисления h . Вычисления [5] показали, что если при проведении К-трансформации будет допущена ошибка по μ_2 в 10 раз, а по ν_2 в 4 раза, то h будет определено с погрешностью, не превышающей 10%. Это замечание справедливо и для определения h в разрезе типа КН. Учитывая это, следует признать, что глубина залегания подошвы карбоновых известняков по профилю III определена с точностью не ниже $\pm 10\%$.

Вычисление h_1 , h_2 , h_3 по четырехслойным кривым типа КН (НЧЗ 10-13) возможно несколькими способами. Рассмотрим это на примере кривой $\tilde{\rho}_m$ НЧЗ 13. Вычисленное по формуле (8) $h_1 + h_2 = 77 \text{ м}$. Удельное сопротивление $\tilde{\rho}_{1,2}$ слоя, эквивалентного двум первым слоям, и величину $(1/\sqrt{f})_{\text{экв}}$ вычислим на основании постоянства произведения $h_{1,2} \rho_{1,2}$. В данном случае $\rho_{1,2} = 143 \text{ Ом}\cdot\text{м}$; $(1/\sqrt{f})_{\text{экв}} = 0,012$.

Точку с этими координатами наносим на бланк кривой НЧЗ. Таким образом трансформируем наблюдаемую четырехслойную кривую типа КН в трехслойную типа Н. По полученной трехслойной кривой типа Н можно вычислить $h_1 + h_2 + h_3$ ранее описанными способами.

Так, по формулам (2) и (3) получено $h_1 + h_2 + h_3 = 128 \text{ м}$ и $\rho_1 = 62 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, а по формулам (6) и (7) — $h_1 + h_2 + h_3 = 119 \text{ м}$ и $\rho_1 = 57 \text{ Ом}\cdot\text{м}$. Оба метода дают весьма близкие результаты. Зная $h_1 + h_2$ и $h_1 + h_2 + h_3$ определим $h_3 = 51 \text{ м}$, т.е. мощность песчано-глинистых отложений, залегающих между подошвой карбоновых известняков и

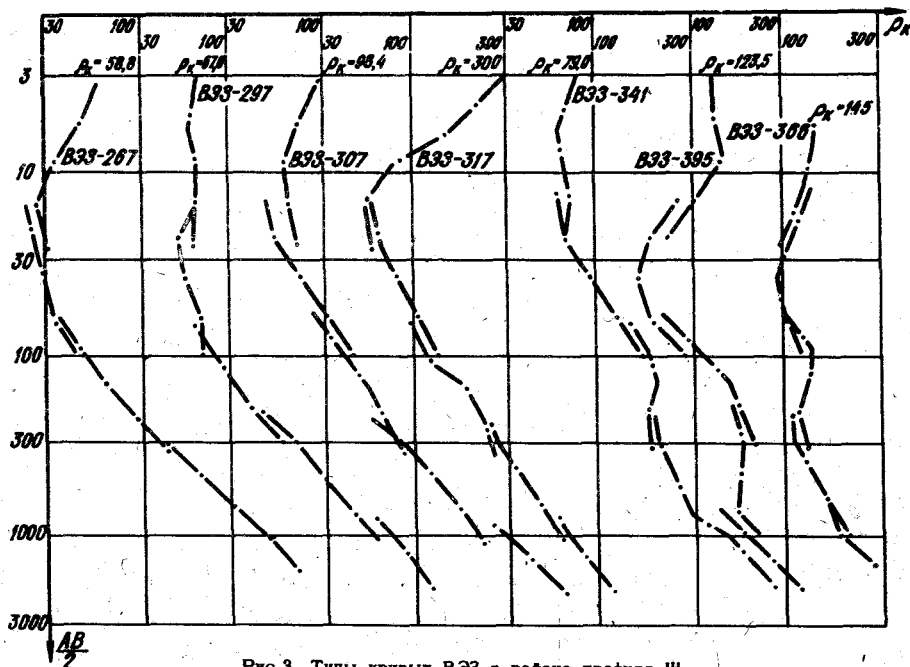


Рис.3. Типы кривых ВЗЗ в районе профиля III

кристаллическим фундаментом, знание которой помогает определять перспективность района на бокситы.

Буровая скважина, расположенная несколько в стороне от НЧЗ 13, вскрыла кристаллический фундамент на глубине 125 м, что практически совпадает с данными вычислений его глубины по кривой $\bar{\rho}_m$ НЧЗ. На рис.2 приведены примеры интерпретации других кривых $\bar{\rho}_m$ и ρ_2 .

Задолго до проведения НЧЗ в районе работ выполнены ВЗЗ (рис.3). ВЗЗ 267 расположено вблизи НЧЗ 2, 3. Кривая ВЗЗ может быть отнесена к типу Н или НА. Если ее рассматривать как кривую типа Н, то глубина фундамента определяется в 50 м, а если как НА, то без знания ρ_2 вычислить глубину залегания фундамента невозможно. Кривая ВЗЗ 297 близка к двухлодной, глубина залегания фундамента, определенная по ней, около 70 м, что близко к данным НЧЗ 4. ВЗЗ 307 расположено около НЧЗ 6. Кривая ВЗЗ относится к типу Н или НА. Вычисление мощностей слоев по ней, без знания ρ_2 и ρ_3 невозможно. То же следует сказать о ВЗЗ 317, расположенном между НЧЗ 7 и 8. Кривая ρ_k относится, по-видимому, к типу НА, и определение h_2 и h_3 без знания ρ_2 и ρ_3 невозможно. По данным НЧЗ глубина залегания фундамента здесь около 150 м. ВЗЗ 341 расположено несколько западнее НЧЗ 9. На кривой ρ_k слабо проявляются карбонатные известняки. Кривая, по-видимому, принадлежит к типу АКН или КН, и без дополнительных сведений о сопротивлениях промежуточных горизонтов определить по ней мощности слоев нельзя. ВЗЗ 395, 366 относятся к типу НКН, и по ним без знания ρ_2 , ρ_3 , ρ_4 вычислить h_2 .

n_3 и n_4 также нельзя. НЧЗ 12, 13, выполненные в этом районе, дают более достоверные сведения о геологическом разрезе. В пользу метода НЧЗ в сравнении с ВЗЗ говорит и большая точность полевых работ и высокая производительность.

Сейморазведочные работы в районе выполнялись зимой 1971-1972 гг., когда замерзали болота. Система наблюдений выбрана так, что преломленную на границе кристаллического фундамента волну всегда наблюдали в области первых вступлений. Использовали станцию «Поиск-1-24-МОВ-ОВ». Длина расстановки 1150 м. Каждая последующая расстановка перекрывала предыдущую по трем каналам. Проводили линейное группирование четырех сейсмоприемников С-130 на базе 9 м. Каждую расстановку отстреливали из двух пунктов взрыва. Разрезы построены методом t_0 при постоянной средней и граничной скоростях. Изучали зону малых скоростей (ЗМС). Средняя поправка на ЗМС не превышала 0,005 с и в годографы преломленных волн не вносилась. Строили разностные годографы и определяли V_T , среднее значение которой 6300 м/с. Среднюю скорость определяли сопоставлением данных о глубине залегания кристаллического фундамента по сейморазведке и ранее проведенному бурению. Она оказалась хорошо выдержанной по площади и равной 1960 м/с. Эффективная скорость, определенная по точкам пересечения годографов, равна 2140 м/с. Это подтверждает правильность определения средней скорости. Глубина фундамента вычислена при постоянной средней скорости. Ошибка не превышала $\pm 10\%$. Изменение V_T по профилям использовали для расчленения пород фундамента по их составу. Удалось выделить четыре группы пород, характеризующихся различными значениями граничных скоростей;

$V_T < 5700$ м/с	- зоны дробления пород, возможные дизъюнктивные нарушения
$5700 < V_T < 6300$ м/с	- осадочно-вулканогенные породы
$6300 < V_T < 6800$ м/с	
$V_T > 6800$ м/с	- интрузии основного и ультраосновного состава

Графики изменения граничных скоростей по профилям сопоставляли с кривыми Δg , снятыми с карты локальных аномалий (рис.4). Сравнение показало, что детальность, получаемая по данным выполненных сейморазведочных работ, не соответствует масштабу построений, возможных по данным гравиметровой съемки, выполненной со средней плотностью наблюдений 1 пункт на 10 км^2 . Даже наиболее плотные породы интрузий ультраосновного состава из-за малых размеров не находят отражения на гравиметровой карте.

Гораздо лучшая коррелируемость результатов наблюдается при сопоставлении графика граничных скоростей V_T с кривыми ΔT_a . Полученный материал иллюстрирует совершенно четкое соответствие аномалиям магнитного поля повышенных значений граничных скоростей.

Наиболее четко положительные аномалии магнитного поля выделяются на кривых ΔT_a , полученных в результате съемки масштаба 1:25000. Эти аномалии связывают с эффузивно-интрузивными образованиями ультраосновного и основного состава (пикритовые метапорфириты, метаперидотиты, оливи-

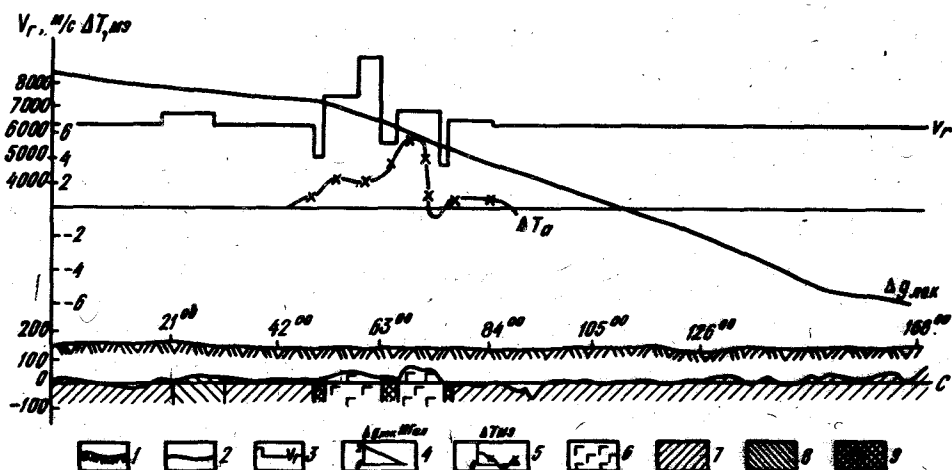


Рис.4. Графики V_T , ΔT_a , $\Delta Q_{\text{лок}}$ и результаты геофизических работ по профилю 1У
 1 - дневная поверхность и пикеты по профилям; 2 - поверхность неизмененных пород кристаллического фундамента по данным сейсморазведки; 3 - кривая изменения граничной скорости по профилю; 4 - кривая $\Delta Q_{\text{лок}}$; 5 - кривые ΔT_a ; 6 - предполагаемые интрузии основных и ультраосновных пород, выделяемые по данным сейсморазведки ($V_T > 6800$ м/с); осадочно-вулканогенные породы с граничными скоростями; 7 - $5700 < V_T < 6300$ м/с; 8 - $6300 < V_T < 6800$ м/с; 9 - предполагаемые зоны механического дробления, дизъюнктивные нарушения, выделяемые по данным сейсморазведки ($V_T < 5700$ м/с)

новые габбро, габбро-диабазы), характеризующимися, по нашим данным, V_T более 6800 м/с. Переменные, слабой интенсивности аномальные магнитные поля, которым соответствуют, по нашим данным, граничные скорости от 5700 до 6800 м/с, вызываются метадиабазами, кварцитами, сланцитами.

Достаточно определенно выделяются на графиках V_T участки с аномально низкими для данного района значениями граничных скоростей, причем повсюду они расположены рядом с участками, на которых мы предполагаем наличие интрузий основного и ультраосновного состава. В данном случае мы связываем низкие значения граничных скоростей с зонами дробления и разуплотнения кристаллических пород.

Это хорошо согласуется с материалами аэромагнитной съемки, по которым отмечается четкая приуроченность выделенных интрузий к зонам разрывных нарушений. Разломы, выделяемые по материалам аэромагнитной съемки масштаба 1:25000, отмечаются по данным сейсморазведки понижением граничных скоростей. Некоторое смещение в плане этих нарушений объясняется тем, что сейсморазведка в данном случае фиксирует только выходные на поверхность кристаллического фундамента зоны дробления, а на результаты магнитной съемки влияет и их глубинное продолжение.

Проведенными работами подтверждается высказанное ранее предположение о том, что в северной части Североонежского бокситоносного района наблюдается приуроченность областей повышенных значений V_T к выступам кристаллического фундамента. Таким образом, мнение геологов об эрозийном происхождении рельефа фундамента получает еще одно обоснова-

ние. На сейсмогеологических разрезах почти повсеместно наблюдается соответствие повышенных значений граничных скоростей (это обычно связано с повышенной плотностью горных пород) приподнятым участкам кристаллического фундамента. Иногда эти участки приобретают типично останцовый характер, свойственный рельефу эрозионного происхождения.

По результатам геофизических работ на участке составлены сейсмогеологические и сейсмоэлектроразведочные разрезы по профилям и карта изогиб поверхности кристаллического фундамента. По совокупности геофизических и геологических данных выделены перспективные участки и намечены места для заложения буровых скважин.

Сравнение глубин залегания фундамента по данным сейсморазведки и НЧЗ (см. рис. 1) показывает их хорошую сходимость. Однако если сейсморазведка дает более точные данные, чем НЧЗ, о глубине фундамента, то НЧЗ лучше расчленяет разрез надфундаментной толщи и картирует подошву карбоновых известняков. Анализ сейсмоэлектроразведочных материалов, полученных партиями, а также карт магнитного и гравитационного полей, позволяют рекомендовать следующую методику поисков бокситоперспективных депрессий в Североонежском бокситоносном районе. Так как на всю площадь района имеются среднемасштабные (частично крупномасштабные) карты магнитного и гравитационного полей и большая часть площади покрыта редкой сетью ВЭЗ, дальнейшее изучение депрессий третьего порядка и поиски более мелких депрессий целесообразно проводить сейсморазведкой КМПВ в сочетании с электроразведкой НЧЗ и высокоточными гравимагниторазведочными работами.

Для повышения экономической эффективности предлагаемого комплекса сейсмические профили следует располагать на расстоянии 4-8 км один от другого. Эти профили будут опорными для наблюдений НЧЗ, располагаемыми по более густой (1-2 км между профилями) сети.

На отдельных профилях КМПВ и НЧЗ, пересекающих депрессии, следует выполнить высокоточные гравиметровые и магнитные наблюдения, которые дадут дополнительные к данным сейсморазведки и электроразведки сведения о составе пород кристаллического фундамента.

Анализ данных всех геофизических работ с учетом имеющихся геологических материалов позволит выделить участки депрессий, перспективные нахождение бокситовых месторождений.

Л и т е р а т у р а

1. Ваньян Л.Л. Особенности частотных электромагнитных зондирований над разрезами типа А. Изв. АН СССР, "Физика Земли", 1961, № 5.
2. Новиккий Г.П. Первый опыт применения частотных зондирований в Североонежском бокситоносном районе. Зап. ЛГИ, т. LXVI, вып. 2, 1974.
3. Хмелевской В.К. Основной курс электроразведки, ч. II. МГУ, 1971.
4. Эненштейн Б.С. Методика интерпретации трехслойных кривых электромагнитных зондирований. Изв. АН СССР, "Физика Земли", 1967, № 5.
5. Эненштейн Б.С. Беспараметрический метод определения глубины залегания кровли кристаллического фундамента. ДАН СССР, 1968, 181, № 2.