

## ДВУХПОЗИЦИОННЫЕ ЗОНДИРОВАНИЯ В ГЕОРАДИОЛОКАЦИИ: ГРАНИЦЫ ПРИМЕНИМОСТИ И ВОЗМОЖНОСТИ МЕТОДА

д-р геол.-минерал. наук С.В. ПОПОВ<sup>1</sup>, канд. геол.-минерал. наук М.П. КАШКЕВИЧ<sup>2</sup>

<sup>1</sup> — Полярная морская геологоразведочная экспедиция, Санкт-Петербург, e-mail: sporov67@yandex.ru

<sup>2</sup> — Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, e-mail: m.kashkevich@spbu.ru

В настоящей работе рассматриваются теоретические аспекты однопозиционных и двухпозиционных зондирований. Особое внимание уделяется случаю, когда расстояние до лоцируемых объектов сравнимо с расстояниями между антеннами (при двухпозиционных зондированиях). Выяснено, что для названных условий вычисления, выполняемые по методике однопозиционных зондирований, вносят дополнительные погрешности. При двухпозиционных зондированиях расчеты, основанные на энергетических характеристиках, затруднены и неточны. Методика двухпозиционных зондирований, в отличие от однопозиционных, при прочих равных условиях позволяет локализовать изучаемые объекты.

*Ключевые слова:* георадиолокация, двухпозиционные зондирования, обработка георадарных данных.

### ВВЕДЕНИЕ

Условия применимости той или иной модели определяются степенью значимости отклонения расчетной величины от ее истинного значения. При авиационных и наземных радиолокационных исследованиях, проводимых в Арктике, Антарктиде и



Рис. 1. Техническое оснащение современных отечественных наземных радиолокационных исследований: а — научный санно-гусеничный поход, Восточная Антарктида (январь 2009 г.); б — опытно-методические георадарные работы на карьере «Новинка», Ленинградская обл. (ноябрь 2011 г.). Фото С.В. Попова.

на горных ледниках большой мощности, вопрос об использовании модели однопозиционных зондирований не ставился даже в том случае, когда приемная и передающая антенны разнесены (рис. 1а), что характерно для данного вида работ (Богородский и др., 1983; Мачерет, 2006; Попов и др., 2003; Crary, Robinson, 1962; GSSI, 2014; Попов, Leitchenkov, 1997; Studinger et al., 2003). Очевидность корректного использования однопозиционной модели обусловлена тем, что расстояние между антеннами на несколько порядков меньше расстояний до объектов зондирования. Однако применительно к георадиолокации — сравнительно новому геофизическому методу, бурно развивающемуся в последние десятилетия (Владов, Старовойтов, 2004; Вопросы подповерхностной радиолокации, 2005; Изюмов и др., 2008), ответ на поставленный вопрос не является очевидным.

На российском рынке хорошо известны отечественные георадары серий «Лоза», «ОКО» и «ОКО-2», «ГЕО», «ГРОТ» и ряд других. При зондировании грунта и ледников хорошо зарекомендовали себя американские георадары GSSI (Geophysical Survey Systems Inc.). Как следует из технических описаний, многие из них, если не большинство (особенно относительно низкочастотные), имеют разнесенные приемные и передающие антенны, особенно для относительно низкочастотного зондирования. В частности, расстояния между ними для приборов «ОКО-2» АБ-400 (рис. 1б) и АБДЛ «Тритон» составляют 35 см и 135 см соответственно. При этом предельная глубина зондирования в условиях средней полосы России составляет около 5 м для первого из них и около 20 м для второго (Радиотехнический прибор..., 2009). Антенны 16–80 МГц GSSI являются полностью разнесенными (GSSI, 2014). Таким образом, глубина залегания рефлекторов, регистрируемых на временных радиолокационных разрезах, полученных с помощью вышеназванных приборов и их аналогов, сравнима с расстоянием между антеннами. В этом случае обработка полученных данных, исходя из модели однопозиционных зондирований, может привести к существенным ошибкам построения глубинного разреза.

Имеется еще один источник ошибок. Для построения глубинного разреза на основе временного необходимо знать кинематические параметры лоцируемых сред. При отсутствии априорной информации их можно получить двумя путями: (1) посредством выполнения наклонных зондирований и (2) расчетами на основе анализа дифрагированных волн от локальных объектов. Первый способ достаточно трудоемок и требует дополнительной подготовки, а иногда и специальной аппаратуры (Богородский и др., 1983; Попов et al., 2003). Второй значительно проще. Он основан на обработке годографов отраженных волн от локальных объектов (Изюмов и др., 2008; Попов, 2002). Опыт показывает, что практически на любом временном радиолокационном разрезе имеются подобные объекты, пригодные для расчетов (т.е. достаточно протяженные и уверенно прослеживаемые). Именно по этой причине данный метод пользуется заслуженной популярностью. С другой стороны, расчет кинематических параметров по неверной модели приведет не только к неправильному определению глубинного положения рефлекторов, но, что гораздо важнее, — к неверному определению диэлектрической проницаемости, а значит, и к неверному истолкованию разреза с позиций геологии.

В настоящей работе приводится сравнение моделей однопозиционных и двухпозиционных зондирований и условий, при которых возможно использование первой из них вместо второй.

## УСЛОВИЯ УПРОЩЕННОЙ ОБРАБОТКИ ГЕОРАДАРНЫХ ДАННЫХ

Выясним условия, при которых, в ходе обработки георадарных данных, расстоянием между антеннами можно пренебречь и тем самым упростить расчеты. Пусть для большей наглядности имеются однородные и изотропные среды с диэлектрическими проницаемостями  $\epsilon_1$  и  $\epsilon_2$ ,  $\epsilon_2 > \epsilon_1$ . Они разделены горизонтальной границей, залегающей на глубине  $H$ . Георадар, осуществляющий двухпозиционные зондирования, располагается на поверхности первой среды (рис. 2). В соответствии с лучевым приближением (Никольский, 1973), расстояние от антенны до рефлектора  $L$  таково, что

$$L = \sqrt{H^2 + b^2}, \quad (1)$$

где  $2b$  — расстояние между антеннами (база).

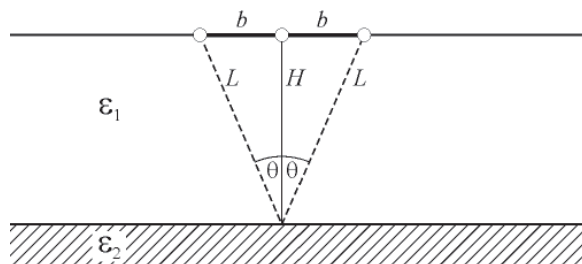


Рис. 2. Схема распространения электромагнитных волн в среде с плоско-горизонтальными границами раздела при двухпозиционных зондированиях.

При выполнении георадарных исследований формируются временные радиолокационные разрезы, на которых каждому расстоянию до объекта-рефлектора  $L$  соответствует временная задержка  $\tau$ , зависящая от диэлектрической проницаемости среды  $\epsilon$ . Если  $c$  — скорость света в вакууме, то глубинный разрез может быть пересчитан во временной, пользуясь соотношением (Богородский и др., 1983; Мачерет, 2006):

$$\tau = 2L\sqrt{\epsilon} / c. \quad (2)$$

Согласно выражениям (1) и (2), отражение на временном радиолокационном разрезе, соответствующее границе раздела сред, располагается на дальности  $\tau_{гр}$  (рис. 2),

$$\tau_{гр} = 2 \frac{\sqrt{\epsilon_1}}{c} \sqrt{H^2 + b^2}. \quad (3)$$

Если обработка данных осуществляется по методике однопозиционной съемки, то кажущаяся глубина залегания границы  $\tilde{H}$  определяется соотношением  $\tilde{H} = \sqrt{H^2 + b^2}$ . Разность между кажущейся и реальной глубинами ( $\Delta H_{12}$ ) составляет

$$\Delta H_{12} = (b^2 + H^2)^{1/2} - H. \quad (4)$$

На рис. 3 представлены результаты вычислений по соотношению (4) для различных значений  $b$ . Для наглядности они приведены в абсолютных (рис. 3а) и относительных (рис. 3б) единицах. Из рисунка, в частности, следует, что реальные глубины залегания объектов меньше, чем кажущиеся.

Условия использования той или иной методики расчетов целиком зависит от конкретных задач. В частности, при выполнении инженерной съемки с целью выявления объектов и приблизительной оценки глубины их залегания, упрощенный

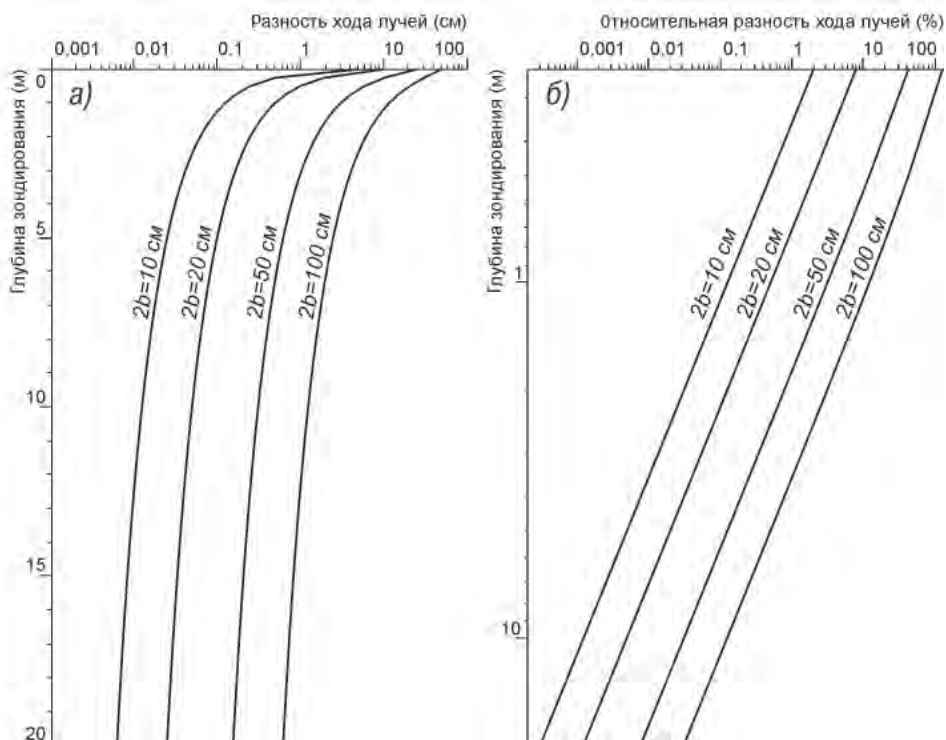


Рис. 3. Абсолютные (а) и относительные (б) величины разности истинной и кажущейся глубин залегания рефлектора при двухпозиционных зондированиях, обрабатываемых по методике однопозиционных.

подход однопозиционных зондирований вполне приемлем. С другой стороны, при проведении прецизионных исследований (например, в гляциологии и климатологии, с целью решения фундаментальных задач определения величины удельной аккумуляции посредством трассирования слоев в снежном покрове (Попов, 2003; Frezzotti et al., 2002, 2004)), расчеты по упрощенной методике будут неприемлемы при  $\Delta H_{12} > 10$  см. Исходя из этого, для георадара «ОКО-2» АБДЛ «Тритон» использование однопозиционного приближения дает результаты, пригодные для прецизионных работ, при зондировании объектов, расположенных на глубинах более 1,5 м (рис. 3).

### ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Помимо увеличения кажущейся глубины рефлектора, обработка данных георадара по упрощенной методике может привести к неверным выводам при анализе энергетических характеристик отраженного сигнала. Снова обратимся к рис. 2. Определим коэффициент отражения Френеля для зеркальной границы при двухпозиционных зондированиях  $R_{fp}$ . Если  $\theta$  — угол падения плоской волны, то, следуя (Никольский, 1973), после соответствующих преобразований получаем

$$R_{fp} = \frac{\epsilon_2 \cos \theta - \sqrt{\epsilon_1} \sqrt{\epsilon_2 - \epsilon_1 \sin^2 \theta}}{\epsilon_2 \cos \theta + \sqrt{\epsilon_1} \sqrt{\epsilon_2 - \epsilon_1 \sin^2 \theta}},$$

или, применительно к двухпозиционным зондированиям (рис. 2),



Рис. 4. Зависимость коэффициента отражения Френеля от глубины зондирования (а) и диэлектрической проницаемости сред (б) при двухпозиционных зондированиях.

$$R_p = \frac{\epsilon_2 H - \sqrt{\epsilon_1} \sqrt{\epsilon_2 (H^2 + b^2) - \epsilon_1 b^2}}{\epsilon_2 H + \sqrt{\epsilon_1} \sqrt{\epsilon_2 (H^2 + b^2) - \epsilon_1 b^2}}. \quad (5)$$

На рис. 4а приведены кривые зависимостей коэффициента отражения Френеля от глубины зондирования при различных базах. Для определенности диэлектрические проницаемости верхней и нижней сред в расчетах составляют 15 (влажный песок (Радиотехнический прибор..., 2009)) и 65 (мокрый торф (Радиотехнический прибор..., 2009)) соответственно. Вычисления производились по соотношению (5). Из приведенных графиков следует, что для рассмотренных случаев результат расчетов коэффициента отражения на глубинах приблизительно до 1 м (для АБДЛ «Тритон» — до 1,5 м) зависит, главным образом, от соотношения глубины залегания границы и базы. Это означает, что производить какие-либо вычисления на основе энергетических характеристик отраженного сигнала при глубинах, меньших, чем названные, практического смысла не имеет.

На рис. 4б приведены зависимости коэффициента отражения Френеля от диэлектрической проницаемости верхней среды в случае, если нижней средой является вода ( $\epsilon_2 = 80$ ), при различных базах. Расчеты также производились по соотношению (5). График показывает, что при значительных базах для глубин порядка 1 м ошибка оценки  $\epsilon$  среды в ряде случаев может составлять более 10 %.

#### РАСЧЕТ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СРЕД ПО ДИФРАГИРОВАННЫМ ВОЛНАМ

При георадарных исследованиях особенно важно знание кинематических характеристик лоцируемых сред. Без этого в конечном счете невозможен корректный

пересчет временного разреза в глубинный. Одним из наиболее простых и действенных методов является определение названных параметров по гиперболическим отражениям от локальных объектов-рефлекторов для случая однородной изотропной среды (Изюмов и др., 2008; Попов, 2002).

Сравним результаты, получаемые при однопозиционных (Попов, 2002) и двухпозиционных зондированиях. Сначала рассмотрим первые из них. Если  $H$  — глубина залегания рефлектора,  $D$  — латеральное расстояние от рефлектора до маршрута и  $x_i$  — расстояние по маршруту, то для однопозиционных зондирований (рис. 5), получаем следующие выражения (Попов, 2002):

$$L_0^2 = H^2 + D^2, \quad (6)$$

$$L_i^2 = H^2 + D^2 + x_i^2 \text{ или}$$

$$L_i^2 = L_0^2 + x_i^2. \quad (7)$$

С учетом (2), уравнения (6) и (7) примут вид

$$\tau_0^2 = 4\epsilon / c^2 (H^2 + D^2) \text{ и} \quad (8)$$

$$\tau_i^2 = \tau_0^2 + \frac{4\epsilon}{c^2} x_i^2, \quad (9)$$

где  $\tau_0$  и  $\tau_i$  — временные задержки отраженного сигнала, соответствующие вершине гиперболического отражения и ее ветвям. Таким образом, соотношение (9) является уравнением годографа гиперболического отражения от локального объекта при однопозиционных зондированиях в однородной изотропной среде.

Обратимся к съемке, выполняемой по методике двухпозиционных зондирований. Применительно к реальной аппаратуре, имеется всего два варианта расположения антенн по отношению к маршруту следования, а значит, и к рефлектору. Один из них предполагает «ортогональное» расположение, при котором антенны находятся по обе стороны от линии маршрута (рис. 1а); другой — «параллельное», при котором антенны двигаются по маршруту одна за другой (рис. 1б). Соответственно, имеются два варианта формирования гиперболического отражения на временном радиолокационном разрезе. Оба они показаны на рис. 5. Там же показаны и обозначения, принятые в нижеследующих расчетах.

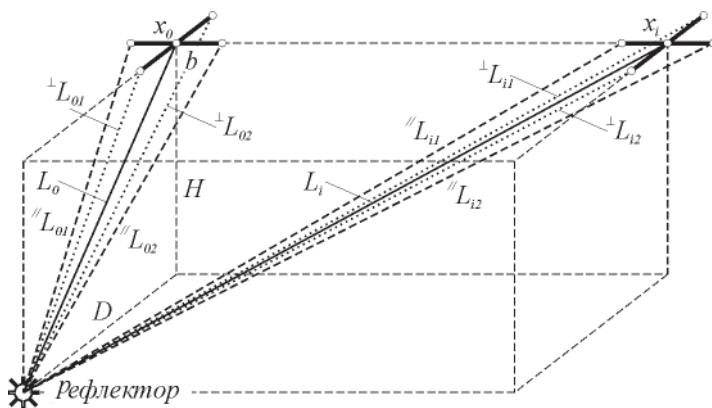


Рис. 5. Схема распространения электромагнитных волн от локального объекта при однопозиционных и двухпозиционных зондированиях.

При двухпозиционных зондированиях с параллельным расположением антенн (рис. 5)  $\|L_{01} = \|L_{02} \equiv \|L_0$ . Тогда:

$$\|L_0^2 = L_0^2 + b^2 \text{ и} \quad (10)$$

$$\left( \|L_{11} + \|L_{12} \right)^2 = \left[ \sqrt{L_0^2 + (x_i - b)^2} + \sqrt{L_0^2 + (x_i + b)^2} \right]^2.$$

После раскрытия скобок, возведения в квадрат и последующих упрощений получаем:

$$\left( \|L_{11} + \|L_{12} \right)^2 = 2 \left[ \|L_0^2 + x_i^2 + \sqrt{\|L_0^4 + 2 \|L_0^2 x_i^2 + x_i^2 (x_i^2 - 4b^2)} \right]. \quad (11)$$

С учетом (2) уравнения (10) и (11) примут вид

$$\|\tau_0^2 = (4\epsilon / c^2) \|L_0^2 = (4\epsilon / c^2)(H^2 + D^2 + b^2) \text{ и} \quad (12)$$

$$\|\tau_i^2 = \frac{\|\tau_0^2}{2} + \frac{2\epsilon}{c^2} x_i^2 + \frac{1}{2c^2} \sqrt{\|\tau_0^2 c^2 (\|\tau_0^2 c^2 + 8\epsilon x_i^2) + 16\epsilon^2 x_i^2 (x_i^2 - 4b^2)}. \quad (13)$$

При двухпозиционных зондированиях с ортогональным расположением антенн (рис. 5) формулы становятся несколько сложнее:

$$\left( {}^\perp L_{01} + {}^\perp L_{02} \right)^2 = \left[ \sqrt{H^2 + (D-b)^2} + \sqrt{H^2 + (D+b)^2} \right]^2 \text{ и}$$

$$\left( {}^\perp L_{11} + {}^\perp L_{12} \right)^2 = \left[ \sqrt{{}^\perp L_{01}^2 + x_i^2} + \sqrt{{}^\perp L_{02}^2 + x_i^2} \right]^2.$$

После преобразований получаем:

$$\left( {}^\perp L_{01} + {}^\perp L_{02} \right)^2 = 2(H^2 + D^2 + b^2) + 2\sqrt{H^4 + 2H^2(D^2 + b^2) + (D^2 - b^2)^2} \text{ и} \quad (14)$$

$$\left( {}^\perp L_{11} + {}^\perp L_{12} \right)^2 = 2(H^2 + D^2 + b^2 + x_i^2) + 2\sqrt{(D^2 - b^2)^2 + (H^2 + x_i^2)(H^2 + x_i^2 + 2(D^2 + b^2))}. \quad (15)$$

С учетом (2) уравнения (14) и (15) примут вид

$${}^\perp \tau_0^2 = \frac{2\epsilon}{c^2} \left[ H^2 + D^2 + b^2 + \sqrt{H^4 + 2H^2(D^2 + b^2) + (D^2 - b^2)^2} \right] \text{ и} \quad (16)$$

$${}^\perp \tau_i^2 = \frac{2\epsilon}{c^2} (H^2 + D^2 + b^2 + x_i^2) + \frac{2\epsilon}{c^2} \sqrt{(D^2 - b^2)^2 + (H^2 + x_i^2)(H^2 + x_i^2 + 2(D^2 + b^2))}. \quad (17)$$

Таким образом, соотношения (13) и (17) являются уравнениями годографа для съемки по методике двухпозиционных зондированиях. При  $b = 0$  уравнения преобразуются в предельный случай однопозиционных зондированиях (9).

Анализ рисунка 5 и уравнений (13) и (17) показывает, что для однопозиционных зондированиях и двухпозиционных зондированиях с параллельным расположением антенн вид гиперболических отражений, помимо  $\epsilon$ , зависит только от расстояния до рефлектора, т.е. соотношение между  $H$  и  $D$  значения не имеет. Иначе дело обстоит с двухпозиционными зондированиями с ортогональным расположением антенн. При



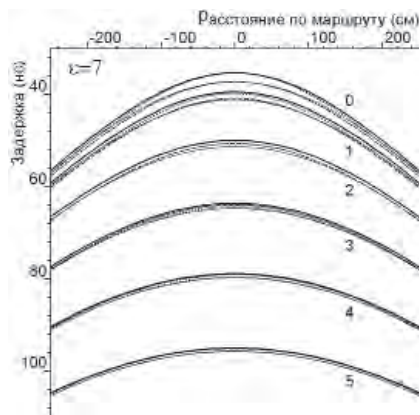


Рис. 6. Кривые, соответствующие годографу от локального объекта, расположенного на различных расстояниях до антенн при  $\epsilon = 7$ .

Утолщенной линией показаны графики, соответствующие однопозиционным зондированиям при постоянной глубине залегания объекта  $H = 2$  м; тонкой линией — для двухпозиционных зондирований с параллельным расположением антенн при постоянной глубине залегания объекта  $H = 2$  м; тонкой пунктирной линией — для двухпозиционных зондирований с ортогональным расположением антенн при постоянной глубине залегания объекта  $H = 2$  м; тонкой штриховой линией — для двухпозиционных зондирований с ортогональным расположением антенн при постоянном латеральном расстоянии до объекта  $D = 2$  м; номер секции — латеральное расстояние в метрах до объекта для первых трех линий и глубина залегания — для последней.

различных соотношениях между  $H$  и  $D$  форма отражений (а значит, и уравнение годографа) будет изменяться. Это непосредственно вытекает из уравнения (17) и рис. 5. Проиллюстрируем вышеизложенное.

Пусть, для определенности, имеется среда с  $\epsilon = 7$  (песок средней влажности (Радиотехнический прибор..., 2009)), в которой на глубине  $H = 2$  м располагается рефлектор. Будем выполнять профильную съемку всеми тремя изложенными выше способами таким образом, чтобы первый профиль пересекал рефлектор ( $D = 0$  м), а следующие располагались на различных расстояниях  $D$ : 1, 2, 3, 4 и 5 м до него. Для определенности будем считать, что работы выполняются АБДЛ «Тритон» (база  $2b = 135$  см). Выполним съемку повторно таким образом, чтобы латеральное расстояние до рефлектора  $D$  было постоянным ( $D = 2$  м), а изменялось лишь глубинное положение рефлектора  $H$ . Сначала объект будет располагаться на поверхности ( $H = 0$  м), а затем на глубинах 1, 2, 3, 4 и 5 м. Если технические характеристики нашей аппаратуры (включая мощность зондирующего импульса и диаграмму направленности антенн) таковы, что в принципе позволяют получать уверенные отражения при названных условиях, то гиперболические отражения, наблюдаемые на временных радиолокационных разрезах, будут иметь форму, приведенную на рис. 6.

Из рисунка видно, что во всех случаях вид годографа различен и различно положение вершин гипербол. Кривые, соответствующие однопозиционным зондированиям, располагаются на меньших дальностях по сравнению с двухпозиционными при параллельном расположении антенн. Годографы, соответствующие двухпозиционным зондированиям с ортогональным расположением антенн, занимают промежуточное положение. При этом если латеральное отклонение от



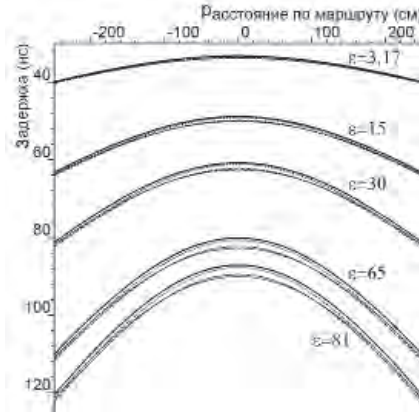


Рис. 7. Годографы отражений от локального объекта, расположенного на одинаковом расстоянии до антенн при различных кинематических параметрах лоцируемых сред.

Утолщенной линией показаны графики, соответствующие однопозиционным зондированиям при  $H = 2$  м и  $D = 1$  м; тонкой линией — для двухпозиционных зондирований с параллельным расположением антенн при  $H = 2$  м и  $D = 1$  м; тонкой пунктирной линией — для двухпозиционных зондирований с ортогональным расположением антенн при  $H = 2$  м и  $D = 1$  м; тонкой штриховой линией — для двухпозиционных зондирований с ортогональным расположением антенн при  $H = 1$  м и  $D = 2$  м.

маршрута меньше, чем глубина положения рефлектора, то на меньших дальностях располагаются и сами кривые. При равенстве глубины залегания и латерального отклонения годографы совпадают.

Аналогичная ситуация наблюдается и при лоцировании сред с различными значениями  $\epsilon$ . На рис. 7 приведены модельные кривые годографов, сформированных от локальных объектов, которые расположены на глубине  $H = 2$  м и  $D = 1$  м для всех рассмотренных видов съемок, а также при  $H = 1$  м и  $D = 2$  м для двухпозиционных зондирований с ортогональным расположением антенн. Рефлекторы находятся в средах с различными кинематическими параметрами. Расчеты производились в предположении использования АБДЛ «Тритон». Из рисунка следует, что, при прочих равных условиях, с ростом  $\epsilon$  среды увеличивается расхождение между годографами, которые соответствуют различным видам съемок.

### ЛОКАЛИЗАЦИЯ ОБЪЕКТОВ ПОСРЕДСТВОМ ПРОВЕДЕНИЯ ДВУХПОЗИЦИОННЫХ ЗОНДИРОВАНИЙ

Выполнение съемки по методике двухпозиционных зондирований, при необходимости, позволит точнее локализовать положение объекта, залегающего на относительно небольшой глубине. Выполним по одному и тому же маршруту съемку по методике двухпозиционных параллельных и ортогональных зондирований (рис. 5). Гиперболические отражения (при их наличии) описываются уравнениями (12), (13) и (17). Решим их относительно  $H$  и  $D$ . Вычтем (13) из (17). После преобразований, с учетом (12), получим

$$\pm \tau_i^2 - \|\tau_i^2 = \frac{2\epsilon}{c^2} \sqrt{(D^2 - b^2)^2 + 2 \frac{\|\tau_0^2 c^2}{2\epsilon} (H^2 + x_i^2) - H^4 + x_i^4} - \frac{1}{2c^2} \sqrt{\mathbb{A}},$$

где  $\mathbb{A} \equiv \|\tau_0^2 c^2 (\|\tau_0^2 c^2 + 8\epsilon x_i^2) + 16\epsilon^2 x_i^2 (x_i^2 - 4b^2)$ . После возведения в квадрат и упрощений получим биквадратное уравнение относительно  $H$ :

$$H^4 - H^2 \frac{\|\tau_0^2 c^2\|}{2\epsilon} + \left[ \frac{c^2}{2\epsilon} (\tau_i^2 - \|\tau_i^2\|) + \frac{1}{4\epsilon} \sqrt{\Delta} \right]^2 - x_i^4 - (D^2 - b^2)^2 - x_i^2 \frac{\|\tau_0^2 c^2\|}{2\epsilon}. \quad (18)$$

Обратимся к уравнению (12). Выразим  $D^2$  через остальные члены и подставим в (18). Раскроем скобки и упростим полученное выражение. Окончательно после преобразований получим:

$$H^2 = \frac{1}{4b^2} \left( \frac{1}{4\epsilon^2} \left[ c^2 (\tau_i^2 - \|\tau_i^2\|) + \frac{1}{2} \sqrt{\Delta} \right]^2 - \left[ \frac{\|\tau_0^2 c^2\|}{4\epsilon} - 2b^2 \right]^2 - x_i^2 \left[ x_i^2 + \frac{\|\tau_0^2 c^2\|}{2\epsilon} \right] \right). \quad (19)$$

Подставив  $H^2$  из (19) в выражение для  $D^2$  из (12), получим значение  $D^2$ .

Таким образом, посредством выполнения двухпозиционных зондирований по одному и тому же маршруту сначала при параллельном расположении антенн, а затем при ортогональном можно определить глубину залегания объекта и латеральное расстояние до него.

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Таким образом, в рамках представленной работы выяснено, что при глубинах лоцирования, сравнимых с расстоянием между антеннами, вычисления, выполняемые по методике однопозиционных зондирований, вносят дополнительные погрешности. Величина последних относительно невелика, и пренебрежение ею зависит от конкретных задач работ. Скорее всего, при выполнении инженерной съемки с целью простого выявления объектов и приблизительной оценки глубины их залегания, обсчет данных вполне возможно осуществлять по упрощенной методике (однопозиционные зондирования). С другой стороны, при проведении прецизионных исследований, связанных с изучением близкозалегających объектов, различия между рассмотренными моделями следует иметь в виду.

С другой стороны, современная аппаратура, предназначенная для георадарного профилирования, позволяет разносить антенны на расстояния до 10 м (Радиотехнический прибор..., 2009; GSSI, 2014). Это открывает большие перспективы в плане использования метода двухпозиционных зондирований с целью построения целевых границ с наибольшей точностью. Основная трудность заключается в том, что суммарный отраженный сигнал есть результат интерференции волн, пришедших с различных неизвестных направлений. Строго говоря, интерпретатор при обработке данных вынужден руководствоваться рядом допущений, в частности, что отражения от целевых границ сформированы вдоль линии профиля. Комбинированная методика однопозиционной и двухпозиционной съемки позволит уточнить истинное положение рефлекторов.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Практические выводы из вышеизложенного состоят в следующем:

- при георадарных исследованиях, в зависимости от задач работ, использование методики расчетов для однопозиционных зондирований при разнесенных антеннах могут быть неприменимы ввиду значительных искажений;
- при двухпозиционных зондированиях расчеты, основанные на энергетических характеристиках объектов, глубина залегания которых сравнима с расстоянием между антеннами, крайне затруднены и неточны;
- методика двухпозиционных зондирований, в отличие от однопозиционных, при прочих равных условиях позволяет локализовать объекты.

*Авторы признательны сотрудникам ПМГРЭ П.И. Луневу и РАЭ С.П. Полякову за рекомендации и конструктивную критику данной работы.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Богородский В.В., Бенгли Ч.Р., Гудмандсен П. Радиогляциология. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 308 с.
- Владов М.Л., Старовойтов А.В. Введение в георадиолокацию. М.: Издательство МГУ, 2004. 153 с.
- Вопросы подповерхностной радиолокации / Под ред. А.Ю. Гринева. М.: Радиотехника, 2005. 416 с.
- Изюмов С.В., Дручинин С.В., Вознесенский А.С. Теория и методы георадиолокации: Учебное пособие. М.: Издательство Московского государственного горного университета, 2008. 196 с.
- Мачерет Ю.Я. Радиозондирование ледников. М.: Научный мир, 2006. 392 с.
- Никольский В.В. Электродинамика и распространение радиоволн. М.: Наука, 1973. 608 с.
- Попов С.В. Определение средней скорости распространения электромагнитных волн в леднике по гиперболическим отражениям от неоднородностей // Мат-лы гляциолог. исследований. 2002. Вып. 92. С. 223–225.
- Попов С.В. Применение ледовой локации для гляциологических исследований // Труды XX и XXI Всероссийских симпозиумов «Радиолокационное исследование природных сред». Вып. 3 / Под ред. М.Н. Марова, В.Д. Степаненко, Ю.А. Мельник, В.Г. Иванова. ВКА им. А.Ф. Можайского, 2003. С. 57–64.
- Попов С.В., Шереметьев А.Н., Масолов В.Н., Лукин В.В. Основные результаты наземного радиолокационного профилирования в районе подледникового озера Восток в 1998–2002 гг. // Мат-лы гляциолог. исследований. 2003. Вып. 94. С. 187–193.
- Радиотехнический прибор подповерхностного зондирования (георадар) «ОКО-2». Техническое описание. Инструкция по эксплуатации. М.: ООО «Логические системы», 2009. 94 с.
- Crary A.P., Robinson E.S. Oversnow traverses from McMurdo to the South Pole // Science. 1962. Vol. 135. P. 291–295.
- Frezzotti M., Gandolfi S., Urbini S. Snow megadunes in Antarctica: Sedimentary structure and genesis // J. Geophys. Res. 2002. Vol. 107(D18), 4344, doi:10.1029/2001JD000673.
- Frezzotti M., Pourchet M., Flora O., Gandolfi S., Gay M., Urbini S., Vincent C., Becagli S., Gragnani R., Proposito M., Severi M., Traversi R., Udisti R., Fily M. New estimations of precipitation and surface sublimation in East Antarctica from snow accumulation measurements // Climate Dynamics. 2004. Vol. 23. P. 803–813. DOI 10.1007/s00382-004-0462-5.
- GSSI Antennas Manual #MN30-903 Rev E. Geophysical Survey Systems, Inc., Salem, NH. 2014. 99 p.
- Hagen J.O., Saetang A. Radio-echo soundings of sub-polar glaciers with low-frequency radar // Polar Res. 1991. Vol. 9. № 1. P. 99–107.
- Popov S.V., Leitchenkov G.L. Radio-echo sounding investigations of Western Dronning Maud Land and North-Eastern Coats Land, East Antarctica // Polarforschung. 1997. Vol. 67. № 3. P. 155–161.
- Popov S.V., Sheremet'ev A.N., Masolov V.N., Lukin V.V., Mironov A.V., Luchininov V.S. Velocity of radio-wave propagation in ice at Vostok station, Antarctica // J. Glaciol. 2003, Vol. 49. № 165. P. 179–183.
- Studinger M., Bell R., Karner G.D., Tikku A.A., Holt J.W., Morse D.L., Richter T.G., Kempf S.D., Peters M.E., Blankenship D.D., Sweeney R.E., Rystrom V.L. Ice cover, landscape setting and geological framework of Lake Vostok, East Antarctica // EPSL. 2003. Vol. 205. P. 195–210.

## **TWO-POSITION GPR SOUNDING: LIMITS AND POSSIBILITIES**

Theoretical aspects of the one-position and two-position GPR technique are discussed in this paper. Particular attention is paid to the case when the distance to the objects is comparable to the distance between the antennas. It was found the calculations performed by one-position method follows to the extra error for these conditions. The calculations based on the energy performance for two-position GPR are difficult and not accurate. Two-position GPR technique allows to localize objects of investigation.

*Keywords:* GPR technique, two-position sounding, processing of GPR data.