

АЭРОВОЗДУШНЫЙ (САМОЛЁТНЫЙ) ВАРИАНТ КОМПЛЕКСА ПОДПОВЕРХНОСТНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИМПУЛЬСНОГО СВЕРХШИРОКОПОЛОСНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

В. Б. Болтинцев

ЗАО НПФ «Геодизонд»

Получена 19 сентября 2012 г.

Аннотация. Излагаются результаты лётно-конструкторских испытаний (ЛКИ) самолётного варианта комплекса подповерхностного электромагнитного импульсного (ЭМИ) сверхширокополосного (СШП) зондирования. Самолётный вариант комплекса отличается от наземного новой геометрией антенн и записью сигнала на компьютер. Представлены результаты «облётного» метода измерений диаграмм направленности (ДН) наземного комплекса подповерхностного ЭМИ СШП зондирования. На примере конкретного полёта показано, что большая глубина распространения сигнала обусловлена использованием ДДРВ генератора как источника излучаемого сигнала и проявляющейся в отражённом сигнале сильной низкочастотной дисперсией диэлектрической проницаемости среды. В ходе ЛКИ совершен пролёт по трассе, на которой были проведены наземные измерения. Путём сравнения установлено принципиальное соответствие между наземными и воздушными ЭМИ СШП измерениями. Эффективность применения самолётных ЭМИ СШП измерений подтверждена выявлением наличия низкочастотной дисперсии диэлектрической проницаемости влажных грунтов, полученных в ходе облёта дельты р. Невы.

Ключевые слова: сверхширокополосный - СШП; ДДРВ (дрейфовые диоды с резким восстановлением обратного напряжения); георадиолокация.

Abstract. The results of flight and design tests of aircraft version of the subsurface electromagnetic impulse (EMI) ultra wideband (UWB) sounding complex are presented in article. The aerial version of the complex differs from the ground version a new geometry of antennas and a record of a signal on the computer. The results of

airborne method of measurements of radiation patterns (RP) of the ground complex of subsurface UWB sounding are presented too. By means of the example of the concrete flight it is shown that the deep of distribution of a signal is caused by use of Drift Step Recovery Diodes (DSRD) generator as source of a radiated signal and the strong low-frequency dispersion which was showed in the reflected signal of dielectric permeability of the environment. The flight on the route on which land measurements were carried out was made during the flight and design tests. The way of comparison established basic compliance between ground and aerial EMI UWB measurements. The efficiency of application of the onboard EMI UWB measurements is confirmed with identification of existence of low-frequency dispersion of dielectric permeability of the damp soil received during flight at the delta of the Neva River.

Keywords: Ultra Wide band - UWB; DSRD (Drift Step Recovery Diodes); underground radar measurements.

Применение авиации сегодня значительно расширяет возможности по сбору и детализации информации. Необходимость самолётного варианта комплекса подповерхностного ЭМИ СШП зондирования обусловлена важностью решения инженерно – геологических задач, в частности, площадных геофизических съёмок с труднодоступными участками, например, сегодня подлежат доразведке 189 месторождений сланцев на территории РФ, большинство из них в тундре; обследование пространства под дном реки на предмет наличия валунов и зон разуплотнения при прокладке нефтегазовых магистралей.

Опыт работы по созданию аэровоздушного варианта комплекса [1 - 3] показал, что сегодня есть все условия для решения этой задачи. Из летательных аппаратов малой авиации выбран малогабаритный самолет STOL-701 (рис. 1). Основные причины такого выбора: разборность конструкции самолёта; короткая взлётно-посадочная полоса (ВПП) 25 ÷ 50 м; наличие малых скоростей

– на скорости 90 км/час при скорости записи данных ЭМИ СШП зондирования в компьютер 5.9 измерений/сек шаг (детальность) геофизической съёмки по траектории полёта составит 4 м (одно измерение через каждые 4 м); существующие варианты шасси самолёта – колёсные, лыжные, поплавковые.

Основной задачей по переводу комплекса подповерхностного ЭМИ СШП зондирования наземного базирования [4, 5] в воздушное оказалось обеспечение надёжной аэродинамики летательного аппарата вследствие выноса антенн под крыло самолёта (передающей – слева от пилота, приёмных – справа). Антенны размещены в качестве «второго крыла» (рис. 2).

Изменение геометрии антенны и волнового сопротивления внешнего пространства потребовало пересчёта параметров микрополосковой антенны и отдельной аттестации новых антенн «по воздуху» ($\rho \approx 377$ Ом, КСВН ≤ 2.25).

Отладка (юстировка) бортовой аппаратуры (рис. 3). Поскольку трасса распространения ЭМИ СШП сигнала меняется по отношению к трассе, характерной для комплекса наземного базирования (воздух – граница воздух/среда - подстилающая среда – границы в среде - граница среда/воздух - воздух), принципиальным моментом является получение сравнительных характеристик сигналов, принимаемых наземными и бортовыми антеннами. Для решения этой задачи передающее устройство на базе ДДРВ генератора с передающей антенной разместили на борту STOL – 701, приёмная часть комплекса подповерхностного ЭМИ СШП зондирования - приёмник (стробоскопический осциллограф) с приёмными антеннами м- и дм- диапазонов размещены на земле, антенны направлены в подстилающую среду. Сигнал с выхода АЦП приёмника непрерывно пишется в компьютер в относительных единицах. В отсутствии сигнала пишется шумовая дорожка. Факт появления сигнала из подстилающей среды, сравнение времени и координат самолётного GPS со временем появления сигнала на компьютере является характерным моментом, подтверждающим функционирование аппаратуры (рис. 3). При этом также возможно оценить эффективную ДН приёмных антенн.

Измерение ДН приёмных антенн комплекса (в полосе отклика среды) «облётным методом» (рис. 4-6). В этом методе [6] имеют дело с подвижной вспомогательной антенной, перемещающейся в пространстве по заданной траектории. Для проведения этих измерений использована методика Цейтлина Н. М. – минимально 3 пролета на разных высотах. Измерения ДН проводятся по схеме: генератор и передающая антенна на борту STOL - 701; приёмник с приёмными антеннами на земле, антенны «смотрят» в подстилающую среду.



Рис.1 - Самолет STOL-701, используемый как летательный аппарат для комплекса подповерхностного ЭМИ СШП зондирования. Технические характеристики STOL-701: размах крыла – 8.23 м; площадь крыла – 11.33 м²; вес (пустой) – 209 кг; дальность – 465 км; крейсерская скорость - 140 ; скорость сваливания – 46.5 км/ч

При этом самолёт с непрерывно излучающей антенной на постоянной высоте с постоянной скоростью проходит над точкой стояния приёмника с приёмными антеннами, его координаты пишутся на борту системой GPS Garmin 60 сх. После прохода над приёмной частью комплекса самолёт делает горизонтальную «петлю» с набором высоты и измерения повторяются. Схема взаимного расположения передающей антенны («второе» крыло на рис. 2) и приёмной части комплекса показаны на рис. 4. Сигнал с приёмника непрерывно



Рис.2 - Размещение антенны под крылом самолета STOL-701. Крепящие антенну металлические тяги электрически развязаны с приёмной и передающей поверхностями антенны

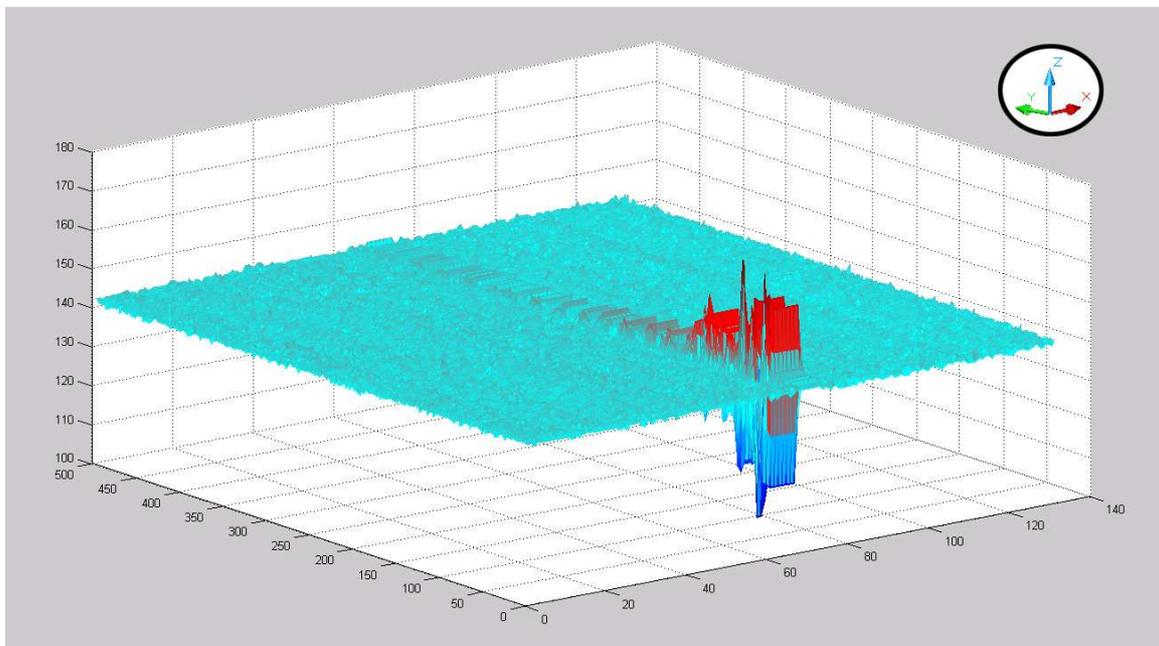
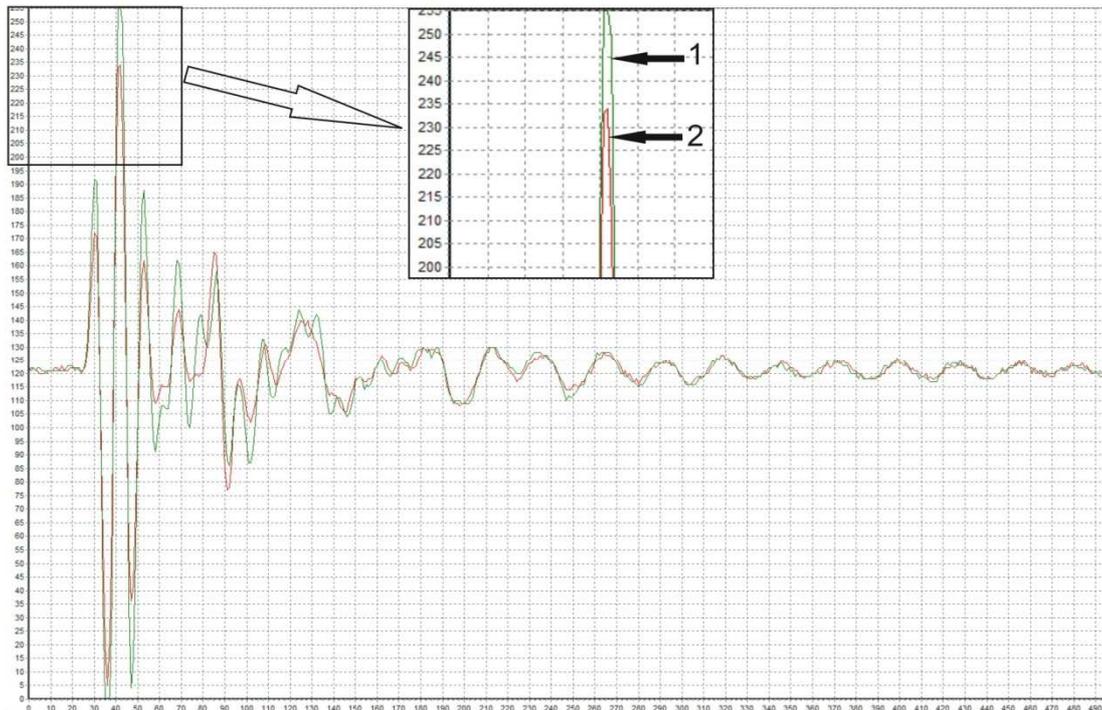


Рис.3 - Сравнение сигналов, принимаемых наземной антенной м - диапазона комплекса ЭМИ СШП зондирования при юстировке бортовой аппаратуры. Передающая часть – на борту самолёта, приёмная на земле. Фоновый цвет - «шумовая» дорожка в отсутствие сигнала; «волной» в глубину-появление сигнала при прохождении над приемной антенной (оси: X - ВПП, детальность по X ~ 4 м; Y – глубина, детальность по Y ~ 4 см; Z – амплитуда сигнала, отн. ед.)



Рис.4 - Измерение ДН приёмных антенн «облётным методом». Высота полёта 20 м; 50 м; 90 м. Скорость 90 км/ч. Справа внизу - приёмник и антенна м-диапазона на ВПП

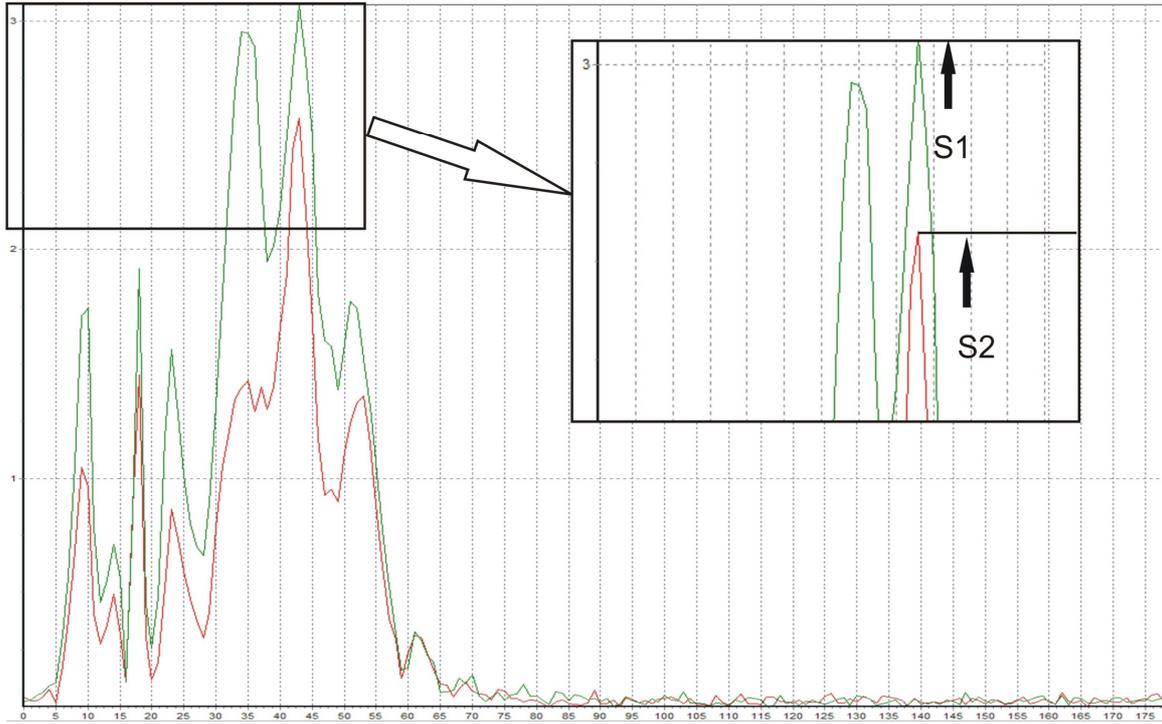
Ампл., отн. ед.



Время, 0.8 нс/точка

Рис.5 - Поведение амплитуды сигнала 2-х соседних измерений м-диапазона при пролёте самолёта 4-х м (сигналы 1, 2) вдоль приёмных антенн, расположенных на ВПП, при измерении ДН приёмных антенн комплекса «облётным методом»

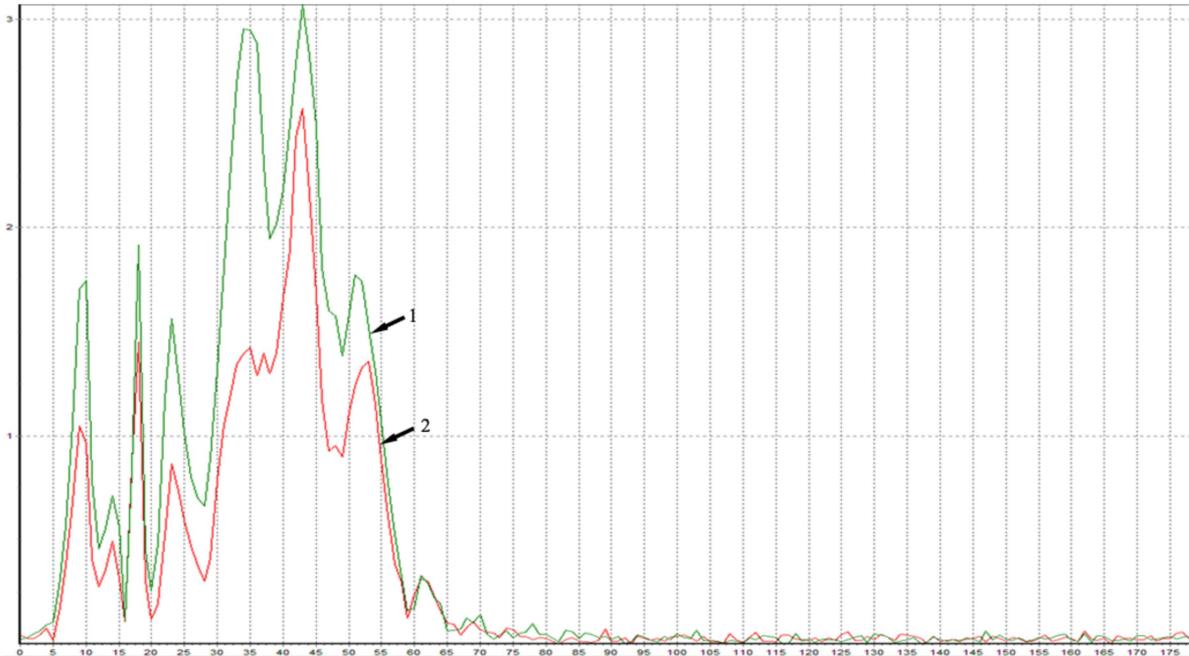
Спектр. пл., Отн.ед./ Гц



Частота, 1.25 МГц/ точка

Рис.6- Изменение амплитуды спектра сигналов м- диапазона (рис. 5) при пролёте самолёта вдоль приёмных антенн при измерении ДН антенн комплекса «облётным методом». В выделенном окне отношение max спектров $S_2/S_1 \sim 0.708$

Спектр. пл., отн.ед./Гц



Частота, 1.25 МГц/точка

Рис. 7 - Спектры сигналов м- диапазона, снятых комплексом наземного базирования (1) и с борта самолёта(2). Координаты точки сравнения спектров привязаны GPS Garmin 60 cx

пишется в компьютер. За ширину ДН в полосе отклика среды принято отношение спектров 0.707 (- 3 дБ) по амплитуде. Программное обеспечение (ПО) позволяет выделять отдельные сигналы, относящиеся к измерениям ДН антенн комплекса подповерхностного ЭМИ СШП зондирования (рис. 5). Вид таких спектров представлен на рис. 6, ширина ДН антенны м-диапазона в полосе отклика среды ($6 \div 81$ МГц) составила $\theta_{3\text{дБ}} \approx 19^\circ (\pm 9.5^\circ)$.

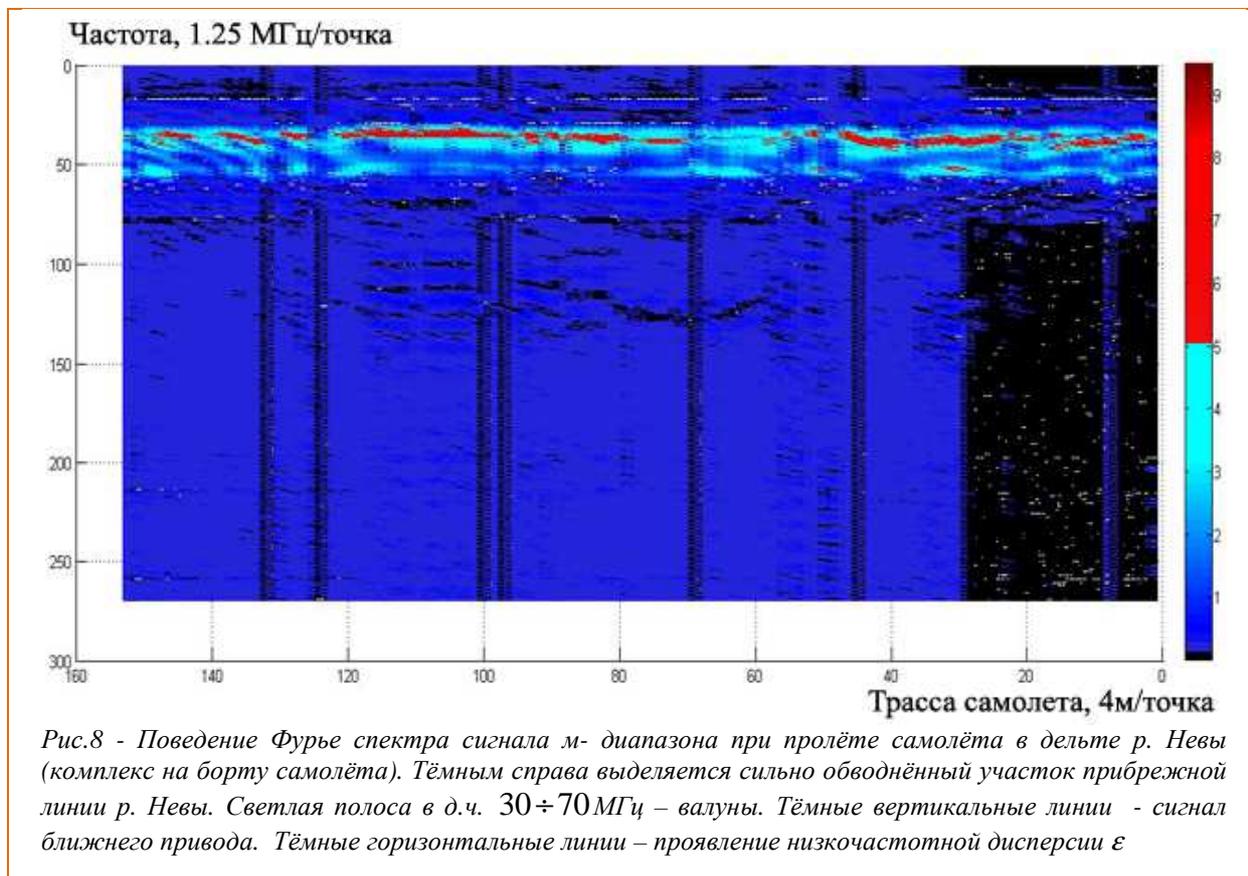
Сравнение результатов наземных и воздушных ЭМИ СШП измерений (рис. 7). Перед проведением измерений с борта самолёта по трассе полёта было проведено 13 наземных измерений методом ЭМИ СШП зондирования подстилающей среды. Результаты наземных измерений приняты за эталонные, при этом глубина зондирования подстилающей среды составила 28 м, по данным этих измерений подстилающая среда трёхслойная (суглинок, валуны, песчаник). Соответствие спектров сигналов самолётного и наземного комплексов представлено на рис. 7.

Низкочастотная дисперсия диэлектрической проницаемости влажных грунтов (рис. 8). В качестве проверки эффективности применения самолётных ЭМИ СШП измерений получено экспериментальное подтверждение наличия дисперсии ε у влажного грунта на прибрежных участках р. Невы, отличающихся большой влажностью грунтов и обилием в грунте валунов. Совершено 4 полёта [1,2]. Проявляющаяся в отражённом сигнале низкочастотная дисперсия ε подстилающей среды визуализирована с помощью ПО Matlab Version 7.9.0.529 (использовано 9 градаций яркости) и представлена Фурье спектром на рис. 8. Наличие такой дисперсии подтверждается также лабораторными измерениями [7, 8].

Полёты горизонтальные. Скорость записи на компьютер 5.9 изм./сек. Высота полёта 50 м. Скорость самолёта 90 км/ч.

Все приведенные выше измерения относятся к дальней зоне ($R > 2D^2 / \lambda$, R – расстояние, D – раскрыв антенны, λ – длина волны).

Предложенный самолётный вариант комплекса ЭМИ СШП зондирования открывает широкие возможности, как по глубинной, так и по площадной съёмке инженерно – геологического строения подстилающей среды.



По результатам аэровоздушных измерений методом ЭМИ СШП зондирования после обработки полетных данных были построены структурные планы на местности, на которых были выделены ряд геологических элементов, хорошо согласующиеся с непосредственными данными бурения [2]. Глубина разведки составила величину порядка 100 м.

Литература

1. Болтинцев В.Б. Аэровоздушные обследования нефтегазовых линий // Отчёт к конференции: Сварочные и родственные технологии для подводных переходов и морских нефтегазовых сооружений. II Научно –

техническая конференция. – 2009, -М.: [http:// neftegas.info/ reports/page/2/](http://neftegas.info/reports/page/2/) - 31 с.

2. Болтинцев В.Б., Агапитова Е. В., Хрусталёв В. С. Аэровоздушный мониторинг подземного пространства методом ЭМИ СШП зондирования // Труды Юбилейного X научно – практического семинара «ГИС для управления территориями, городами, предприятиями». - 2011, г. .Анапа). http://cbt.ru/images/presentations/anapa_2011/agapitova_2011.pdf -17 с.

3. Salikhov R., Petrov M., Golmshtok E., Boltintsev V., Pjakhin V., Andrianov S., Blokhin A. Forming New Market Niches: Strategy For Improving The Competitiveness of Oil Shale Products; http://www.oil-shale.ru/data/uploads/Salikhov_Ruslan_Atomenergoproekt_JIOSS_2012.pdf- 34 с.

4. Пат. № 2144682. Российская Федерация 7 G 01 S 13/02. Способ радиолокационного зондирования геологического разреза / Болтинцев В.Б.; заявитель и патентообладатель Болтинцев В.Б. - №99104111/09; заявл. 01.03.1999; опубл. 20.01.00, Бюл.№ 2. – М.: 2000.- 12 с. 2.

5. Болтинцев В. Б., Ильяхин В. Н., Безродный К. П. Метод электромагнитного импульсного сверхширокополосного зондирования подстилающей среды // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал], 2012, №1. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/jan12/14/text.pdf>.

6. Методы измерения характеристик антенн / Л. Н. Захаров, А. А. Леманский, В. И. Турчин и др. / Под ред. Н. М. Цейтлина - М.: Радио и связь. 1984.- 386 с.

7. Фролов А. Д. Электрические и упругие свойства мёрзлых пород и льдов. Пущино: ОНТИ ПНЦ РАН, 2005. -607 с.

8. Болтинцев В.Б. Определение диэлектрических свойств сложных грунтов при электромагнитном импульсном сверхширокополосном зондировании подстилающей среды // Промышленное и гражданское строительство. 2011, №11. – С.25-28.