

## Первые результаты тестирования технологии БПЛА-МПП на Байкале

Ю.А. Давыденко<sup>1</sup>, А.С. Башкеев<sup>2</sup>, С.В. Яковлев<sup>3</sup>, М.С. Шкиря<sup>4</sup>, С.В. Бухалов<sup>5</sup>, Е.А. Крайнова<sup>6</sup>,  
М.В. Шарлов<sup>7</sup>, А.В. Паршин<sup>8</sup>, М.Г. Персова<sup>9</sup>

<sup>1</sup> ИРНТУ, ООО «Гелиос», ИЗК СО РАН, [dya@geo.istu.edu](mailto:dya@geo.istu.edu)

<sup>2</sup> ИРНТУ, [abashkeev@geo.istu.edu](mailto:abashkeev@geo.istu.edu)

<sup>3</sup> ИРНТУ, ООО «Гелиос», [isv@geo.istu.edu](mailto:isv@geo.istu.edu)

<sup>4</sup> ИРНТУ, [mshkiria@geo.istu.edu](mailto:mshkiria@geo.istu.edu)

<sup>5</sup> ИРНТУ, [sbukhalov@geo.istu.edu](mailto:sbukhalov@geo.istu.edu)

<sup>6</sup> ИРНТУ, [krajnova\\_k94@mail.ru](mailto:krajnova_k94@mail.ru)

<sup>7</sup> ООО «Сигма-гео», ИЗК СО РАН, [sharlov@sigma-geo.ru](mailto:sharlov@sigma-geo.ru)

<sup>8</sup> ИРНТУ, ИГХ СО РАН, [sarhin@geo.istu.edu](mailto:sarhin@geo.istu.edu)

<sup>9</sup> НГТУ, [persova@ami.nstu.ru](mailto:persova@ami.nstu.ru)

---

### АННОТАЦИЯ

Целью опытно-методических работ на льду озера Байкал было тестирование обновленной модификации системы БПЛА-МПП – индукционного датчика на БПЛА-носителе, регистрирующего переходные процессы, возбуждаемые в среде последовательностью разнополярных импульсов тока, проходящих через заземленную линию. В качестве репера использовалась граница пресной воды с относительно высоким сопротивлением с проводящим слоем донных отложений. В результате трехмерного моделирования и сравнения с результатами других электромагнитных зондирований (ЗСБ, МТЗ и ЭМЗ-ВП) показано, что чувствительности технологии достаточно не только для выделения проводящего горизонта донных осадков под водной толщей в 200-300 м, но и обнаружения в нем высокоомных объектов, вероятно связанных с наличием в разрезе газогидратов.

**Ключевые слова:** БПЛА, электромагнитные зондирования, геоэлектрический разрез, магнитотеллурические зондирования, ЗСБ, МПП, газогидраты

---

### ВВЕДЕНИЕ

Байкал для электроразведки является уникальным полигоном с достаточно понятными и условно изотропными свойствами среды. УЭС воды Байкала составляет около 160-200 Ом·м. Под водой находятся проводящие донные отложения с сопротивлением в десятки Ом·м, залегающие на высокоомном гранитном основании. Эту трехслойную, условно изотропную, модель могут осложнять различные геологические факторы, в том числе - наличие линз высокоомных газогидратов, находящихся на глубине более 360 м (Хлыстов и др., 2011). Таким образом, оз. Байкал является отличным местом для тестирования электроразведочных систем. Вблизи поселка Большое Голоустное на льду Байкала в марте 2017 г. проводился комплекс опытно-методических работ технологиями электромагнитного зондирования и вызванной поляризации (ЭМЗ-ВП), магнитотеллурические зондирования (МТЗ) станциями «Вега» и вертикальные электрические зондирования (ВЭЗ); ранее ОМР также проводились М.В. Шарловым методом зондирования

становлением поля в ближней зоне (ЗСБ-М) (Sharlov et al, 2017). На этом хорошо изученном полигоне в марте 2020 года проводилось тестирование модернизированной (по сравнению с вариантом 2020 г. (Parshin et al, 2021)) системы регистрации электромагнитных зондирований на беспилотном летательном аппарате БПЛА-МПП, что позволяет сделать обоснованные выводы о эффективности этого нового метода.

### МЕТОДЫ И ТЕОРИЯ

Технология БПЛА-МПП подразумевает использование горизонтальной электрической линии (ГЭЛ) в качестве питающей установки и незаземленную рамку (петлю) в качестве приемной (Parshin et al, 2021). Данную конфигурацию принято называть установкой «линия-петля». Генераторный диполь АВ заземлялся стальными тросами через пробуренные во льду лунки. Толщина льда составляла около одного метра. Гексакоптер буксирует измерительную систему, состоящую из 4-х канального регистратора (Mars 4), датчика-аналога петли 50 или 20

метров, и микрокомпьютера для управления измерительным модулем и сохранения данных (Рис. 1а), оснащенный системой GNSS-привязки данных измерений. В данной статье представлены результаты обработки данных, полученных с датчика ПДИ-50. В регистраторе использовались АЦП последовательного приближения с частотой 100 кГц. С целью увеличения динамического диапазона регистрация переходных процессов велась на двух коэффициентах усиления. Конструкция измерительной системы была собрана из модуля, предназначенной для пешеходной съемки и отличалась значительной массой. Масса буксируемой части в данном варианте достигает почти 8 кг, однако в дальнейшем будет существенно снижена. Конструкция подвеса обеспечила стабилизацию измерительной системы по горизонту в условиях среднегорного рельефа при крейсерской скорости полета 8 м/с при базе осреднения около 1 с., что позволило произвести кондиционную съемку переходных процессов. Среда возбуждалась прямоугольными разнополярными импульсами с паузой длительностью по 10 мс и силой тока 4,5 А. Источником тока служил 5кВт трехфазный дизель-генератор и коммутатор ЭГИ-5000. Особенности регистратора для пешеходной съемки наложили ограничения на БПЛА съемку, не позволив вести регистрацию максимально эффективно, поэтому регистрировалось 25 кривых зондирования в секунду, вместо 50. Граф обработки данных БПЛА-МПП основан на графе обработки данных ЭМ-зондирования морской буксируемой системы (Davudenko et al, 2019), который в свою очередь базируется на графе обработки ЭМЗ-ВП (Veeken et al, 2009) и включает: накопление и осреднение записей переходных процессов на заданные пространственные или временные интервалы; подавление промышленных помех (50 Гц) от используемого электрогенератора; выделение спадов; устранение тренда, вызванного движением приемной петли в пространстве; робастное сглаживание в скользящем окне, где длина окна – отсчеты АЦП по спаду, а ширина окна – накопления; интегрирование в кривую зондирования; привязка кривых зондирования к координатам (Parshin, 2021). Технологией БПЛА-МПП за два неполных рабочих дня было записано 15 профилей (Рис. 2б) общей протяженностью 14,5 пог.км. Часть полетов была выполнена в районе заземления генераторного диполя для оценки областей, в которых индукционный датчик позволяет, либо не позволяет получить адекватные геологические модели – аналогичные исследования были проведены и для установки «линия-линия» (Ageenkov et al,

2012).

Представление о геоэлектрическом строении прибрежной зоны Байкала в районе пос. Большое Голоустное было получено в 2017 г по результатам опытно-методических работ комплексом методов ЭМЗ-ВП, МТЗ, ЗСБ-М, ВЭЗ (Шкиря и др, 2018, Sharlov et al, 2017).

Технологией ЭМЗ-ВП было записано четыре профиля, два из которых располагались ортогонально относительно питающего диполя А17В17 (Рис. 1б). Длина генераторного диполя составила 1 км, для возбуждения разнополярных импульсов тока использовался генератор ВП-1000м. Для заземления приемных линий использовались свинцовые электроды, которые опускались в лунки, пробуренные с шагом 50 м.

Сопоставление результатов ЭМЗ-ВП, полученных от параллельной (генераторный и приемные диполи параллельны) и ортогональной (генераторный и приемные диполи перпендикулярны) установок, показало, что имеется существенное трехмерное влияние байкальской впадины на результаты одномерной инверсии, и следует применить аппарат трехмерного моделирования.

Кроме того, был измерен сигнал от вертикального электрического диполя – провод ГПМП длиной около 100 м заводнили в лунку на точке В17 (Рис. 1б), привязав к его концу кусок торса. Регистрировалась радиальная компоненты Е<sub>г</sub>. Результаты моделирования, выполненные М.Г. Персовой показали, что горизонтально-слоистая модель, полученная для классической (параллельной) установки, хорошо описывает данные вертикального электрического диполя.

Две станции МТЗ «ВЕГА» были установлены примерно в 500 м и 1 км от полигона ЭМЗ-ВП 2017 года. Длины диполей для измерения Е<sub>х</sub> и Е<sub>у</sub> компоненты составляла по 25 м от центрального электрода и ориентированы по сторонам света. Заземление осуществлялось свинцовыми неполяризуемыми электродами. Магнитный датчик Н<sub>z</sub> был ориентирован вертикально в высверленной во льду лунке. К сожалению, уверенный сигнал на низких частотах получить не удалось из-за сильного ветра. При следующих экспериментах планируется строить укрытие для электродов из льда.

Вертикальные электрические зондирования установкой «диполь-диполь» проводились в 2017 и в 2021 гг. с целью определения УЭС воды и верхней части донных отложений. В 2017 г. длина АВ составила 100 м. Расстояние до ближнего приемного электрода 10 м и далее регистрировалось 4 разноса с шагом 50 м. В 2021 г. фактически использовалась установка «поль-диполь» при длине АВ 2,1 км. Расстояние

до ближайшего – 50 м и далее 12 разносов с шагом 25 м.

ЗСБ-М проводились в 2017 г. М.В. Шарловым (Sharlov et al, 2017) с целью исследования влияния геометрии установки на переходные процессы. В данной работе использовались соосные и разнесенные установки от двух генераторных петель со стороной 100 м и приемной петлей со стороной 18 м. Расстояние от центра генераторной петли до разнесенных установок составляла 100 м. Зондирования 108 и 109 оказались наиболее близки к точкам МТЗ, что позволило использовать эти данные для введения уточнения строения верхней части разреза при инверсии данных МТЗ.

Совокупность использованных технологий позволило получить представление о геоэлектрическом строении среды в области проведения испытаний БПЛА-МПП с целью верификации получаемых данных.

### РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты интерпретации данных, полученных различными электроразведочными системами 2017 и 2021 гг. были обобщены и использованы при моделировании. Первоначальное представление о трехслойной изотропной среде «вода – донные осадки – гранитное основание» претерпело существенное изменение при анализе результатов, полученных различными электроразведочными системами.

Генеральная модель среды была получена по данным МТЗ по результатам 1D-инверсии, выполненной М.С. Петрищевым (Шкиря и др, 2018). Т. к. МТЗ при частоте регистрации 1 кГц и используемых датчиков не обладает высокой чувствительностью к верхней части разреза, то полученное сопротивление воды в 270 Ом·м можно не принимать во внимание. Под слоем воды донные осадки до глубины около 3-х км с сопротивлением от 10 до 200–300 Ом·м. Гранитное основание имеет сопротивление первые тысячи Ом·м, под которым находятся низкоомные породы. Полученные данные не противоречат результатам экспериментов, представленных в статье Ю.Ф. Мороза (Мороз и др, 2012).

Более точное определение УЭС воды было получено по результатам интерпретации кривых ВЭЗ. В рамках двухслойной 1D-модели невозможно подобрать кривую ВЭЗ в то время, как трехслойная модель, когда слой воды делится на два слоя: относительно низкоомный верхний слой и относительно высокоомный нижний (Табл. 1). Сопротивление верхней части донных осадков более уверенно было определено в 2021 г за счет большего разноса установки – 27 Ом·м.

Для дальнейших инверсий ЭМЗ было взято

сопротивление воды в 180 Ом·м.

О наличии локальных высокоомных включений в донных осадках было выяснено при инверсии данных съемок ЭМЗ-ВП (ортогональная установка) и ЗСБ-М на точках 105, 106, 107 (Рис. 2б) за 2017 г. Без высокоомного слоя на глубине 300–400 м. подобрать кривую ЗСБ не удалось (Рис. 2в). В данных ЭМЗ-ВП (параллельная установка) за 2017 и 2021 (Рис. 2а) г. и на точках ЗСБ-М 108, 109 (Рис. 2б) высокоомных объектов не обнаружено. Так же данные объекты не видны в результатах МТЗ, что говорит о локальности включений. Такими объектами могут являться линзы газогидратов, которые неоднократно фиксировались на Байкале в том числе и на глубине 400 м во время экспедиций Лимнологического института СО РАН (Хлыстов и др., 2011).

После изучения среды Байкала различными электроразведочными системами можно было приступить к инверсии данных БПЛА-МПП со знанием того, что в разрезе могут встречаться высокоомные объекты.

Переходные процессы, зарегистрированные с более высокими коэффициентами усиления, не использовались в связи с высоким уровнем шумов. Кривые зондирования БПЛА-МПП устойчиво регистрируются на диапазоне до 0,7–0,8 мс, (Рис. 3а), что обеспечивает теоретическую глубинность исследований до 300 м. При интерпретации данных БПЛА-МПП мы столкнулись с проблемами обработки Аэро-МПП – высокой плотностью данных съемки и их значительного количества. За два неполных дня было получено более 2100 точек зондирования с шагом в среднем 7 м, что заставило внедрить многопоточные алгоритмы инверсии в Mars1D. По результатам 1D-инверсии были получены непротиворечащие априорным данным разрезы по профилям, которые тем не менее слабо увязывались друг с другом. Например, сопротивление донных осадков могло существенно изменяться от профиля к профилю. Адекватную картину удалось получить при использовании 3D-инверсии в программном комплексе М.Г. Персовой (Persova et al, 2021), хорошая сходимость модельных и наблюдаемых кривых так же показана на Рис. 3а.

Как наиболее характерный взят разрез по профилю 8 (линия 1–2), который выходит на береговую линию (Рис. 3б). По результатам БПЛА-МПП донные осадки имеют низкие значения УЭС около 30–120 Ом·м, в которых имеются высокоомные включения с сопротивлением от 400 до 1200 Ом·м (возможно линзы газогидратов). Уверенности в определении их мощности нет, однако их положение в плане уверенно прослеживается на соседних профилях. Коренные породы,

выходящие на берег (на рисунке слева), имеют сопротивление более 1000 Ом·м. По данным БПЛА-МПП возможно предположить наличие надвиговой структуры.

При 3D и 1D моделировании мощность водного слоя задавалась по логичности, что в целом позволило достичь хорошей сходимости наблюдаемых и модельных кривых. Таким образом, относительно проводящий слой на глубине от 10 до 200 м. под водным слоем с УЭС 180 Ом·м уверенно определяется, что позволяет оценить глубинность данной съемки в минимум 200 м.

### Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 20-67-47037 «Методологическое и программное обеспечение обработки больших объемов данных электромагнитных зондирований, гравиразведки и БПЛА-магниторазведки на основе комплексного решения трехмерных обратных задач рудной геофизики».

### Выводы

По результатам работ были сделаны следующие выводы о конструкции измерительной системы: необходимо существенно облегчить датчик и блок регистрации. В полете датчик ПДИ-20 уступает по помехозащищенности и чувствительности датчику ПДИ-50, в то время как при статических измерениях кривые переходных процессов от обоих датчиков практически идентичны. Можно сделать вывод, что для БПЛА-МПП следует использовать датчик с большим моментом, чтобы регистрировать слабые сигналы и фильтровать на входе регистратора высокочастотную помеху.

Летом 2021 были использованы новые технологические решения, разработанные с учетом проведенных на Байкале испытаний – успешно прошел испытание комплекс с облегченным круглым датчиком ПДИ-50А и с 2-канальным блоком регистрации Mars 2/2.

Качество полученных данных позволяет выполнять трехмерное моделирование, при этом глубинность исследования оценивается около 300 м при устойчивом времени регистрации переходного процесса в 0,7–0,8 мс. Разработанная технология БПЛА-МПП, имеет большой потенциал в усовершенствовании, но уже в текущем состоянии позволяет получать результаты, имеющие геологическую ценность, что позволяет использовать в научно-исследовательских проектах и производственных работах.

### ЛИТЕРАТУРА

- Давыденко Ю.А., Попков П.А., Новопашина А.В. Перспективы использования индукционной составляющей переходного процесса в традиционных методах постоянного тока // Геофизические исследования. 2015. Т. 16, № 4. С. 73–84.
- Мороз Ю.Ф., Мороз Т.А. Глубинный геоэлектрический разрез Байкальского рифта // Вестник Камчатской региональной организации Учебно-научный центр. Науки о Земле. 2012. № 20. С. 114-126.
- Патент на изобретение № 2574861, RU 2012134345/28 Способ измерения и обработки переходных процессов с заземленной линией при импульсном возбуждении электрическим диполем с целью построения геоэлектрических разрезов и устройство для осуществления этого способа с помощью аппаратно-программного электроразведочного комплекса (АПЭК "МАРС"). Авторы изобретения: Давыденко Ю.А., Давыденко А.Ю., Пестерев И.Ю., Яковлев С.В., Давыденко М.А., Комягин А.В., Шимьянский Д.М. Приоритет изобретения от 1 августа 2012 г., Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 10 февраля 2016 г., Правообладатель: Общество с ограниченной ответственностью «Гелиос».
- Хлыстов О.М., Кононов Е.Е., Хабеев А.В. Газогидратные скопления в донных осадках озера Байкал // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле РАН. №2(39). 2011. С. 247-252.
- Шкиря М. С., Терёшкин С.А., Давыденко Ю. А., Петрищев М.С. Применение комплекса электромагнитных зондирований изучения электропроводности донных отложений озера Байкал// Геобайкал 2018
- Ageenkov E.V., Davydenko Yu.A., Fomitskii V.A. Influence of the off-axis position of the transmitter and receiver circuits on the results of differentially normalized electromagnetic sounding // Russian Geology and Geophysics. 2012. V. 53. P. 116-121.
- Davydenko, Y., Bashkeev, A., Iakovlev, S., Pesterev, I., Roginsky, K. System of electromagnetic sounding intended for a high resolution engineering site surveying on the shallow water // 81st EAGE Conference and Exhibition 2019. 2019. DOI: 10.3997/2214-4609.201901128

Parshin, A., Bashkeev, A., Davidenko, Y., Persova, M., Iakovlev S., Bukhalov S., Grebenkin N., Tokareva M. Lightweight Unmanned Aerial System for Time-Domain Electromagnetic Prospecting — The Next Stage in Applied UAV Geophysics. Appl. Sci. 2021, 11, 2060. <https://doi.org/10.3390/app11052060>

Persova M.G., Soloveichik Yu.G., Vagin D.V., Sivenkova A.P., Kiseleva A.S. and Tokareva M.G. The possibilities of geometric 3-D inversion for processing the UAV-TDEM data // Conference Proceedings, Engineering and Mining Geophysics 2021, Apr 2021, Volume

2021, p.1 - 7  
 Sharlov M.V., Kozhevnikov N.O., Sharlov R.V. Lake Baikal-A Unique Site for testing and calibration of near-surface TEM systems // 23rd European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics. 2017. DOI: 10.3997/2214-4609.201702038

Veeken P.C.H., Legeydo P.Y, Davydenko Yu.A., Ivanov S.A., Kudryavceva E.O., Chuvaev A.A. Benefits of the induced polarization geoelectric method to hydrocarbon exploration // Geophysics. 2009. V. 74, № 2. P. 47-58.

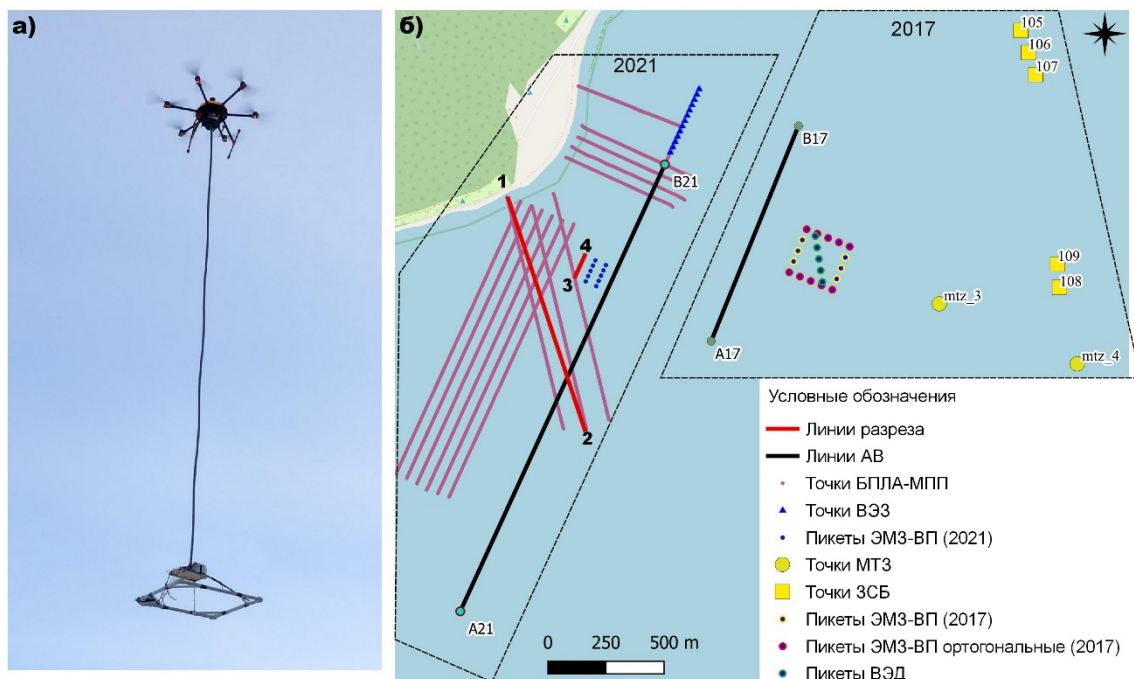
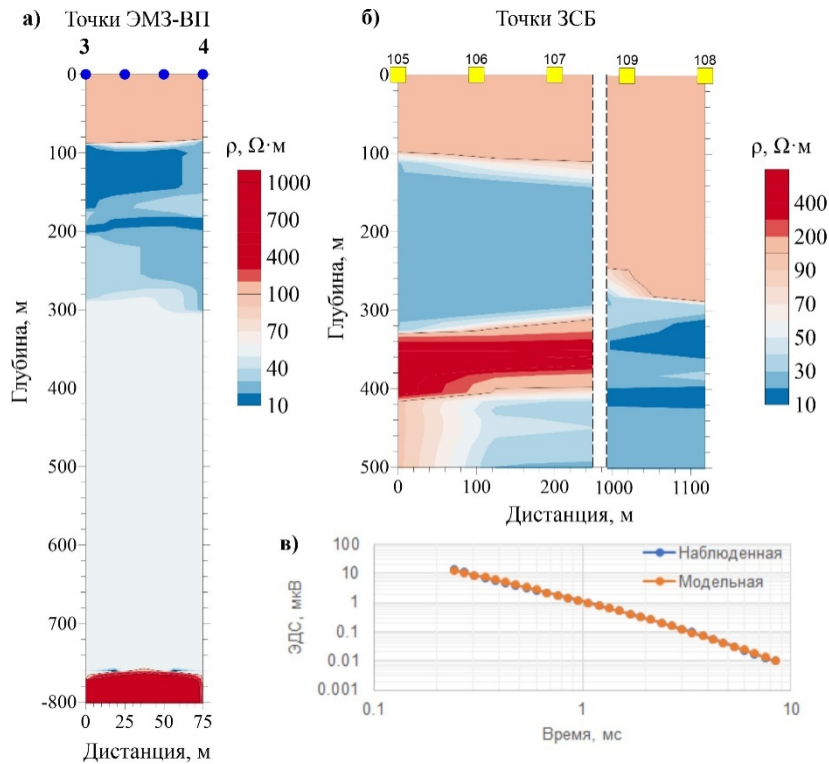


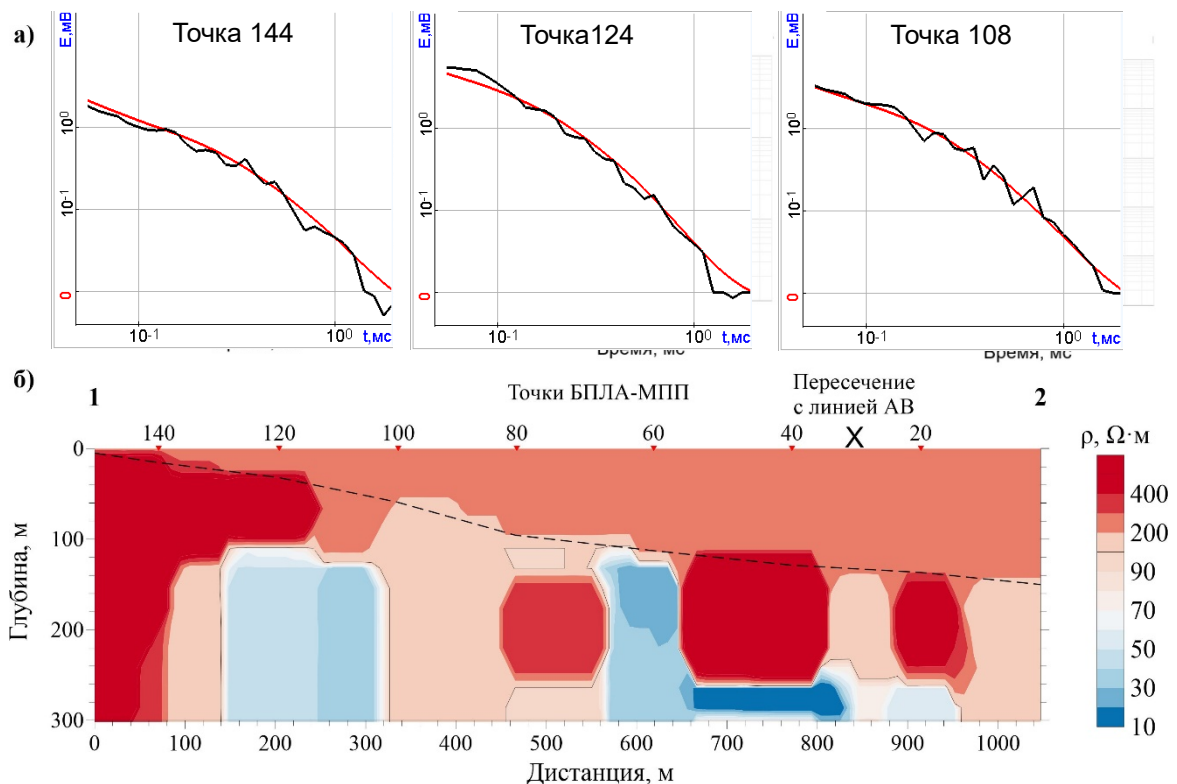
Рисунок 1. а) Общий вид измерительной системы БПЛА-МПП; б) Схема проведенных работ.

| Слой | ВЭЗ 2017    |                              | ВЭЗ 2021    |                              |
|------|-------------|------------------------------|-------------|------------------------------|
|      | Мощность, м | УЭС, $\Omega \cdot \text{м}$ | Мощность, м | УЭС, $\Omega \cdot \text{м}$ |
| 1    | 35          | 170                          | 28          | 183                          |
| 2    | 85          | 236                          | 50          | 202                          |
| 3    | $\infty$    | 74                           | $\infty$    | 27                           |

Таблица 1. Удельные электрические сопротивления воды и верхней части донных отложений по данным ВЭЗ



**Рисунок 2.** Разрезы сопротивлений, полученный по результатам 1D-инверсии: а) по линии 3-4 по данным ЭМЗ-ВП; б) по данным ЗСБ; в) сходимость наблюдаемой и модельной кривых для точки ЗСБ 106.



**Рисунок 3.** а) Наблюдаемые кривые (черной линией) и рассчитанные 3D моделированием (красной линией) БПЛА-МПП для точек 144, 124 и 108; б) Разрез сопротивлений, полученный по результатам 3D-инверсии по данным БПЛА-МПП. Пунктиром отмечена глубина оз. Байкал.