

*Н.А. Нестеров, М.А. Науменко, В.В. Гузиватый, С.Г. Каретников*

## ГИДРОЛОКАЦИОННОЕ ОБСЛЕДОВАНИЕ ДНА ПРИ ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА

*N.A. Nesterov, M.A. Naumenko, V.V. Guzivaty, S.G. Karetnikov*

## SONAR SURVEY OF THE LAKE LADOGA SEA BED FOR GEOMORPHOLOGICAL STUDIES

*В статье рассматриваются некоторые аспекты технологии гидролокационного обследования дна Ладожского озера при планировании и проведении геоморфологических исследований. Отмечается что, современные гидролокационные средства являются эффективными средствами обследования. Морфометрическая «картина», которая может быть получена с помощью гидролокационного обследования, позволит провести подробный анализ неоднородности геологического строения дна для определения характера тектонических движений и степени воздействия экзогенных рельефообразующих процессов.*

*Ключевые слова: гидролокационное обследование, гидролокатор бокового обзора, микрорельеф, гидроакустическое изображение.*

*Some aspects of the sonar survey technology the lake Ladoga bottom in planning and conducting geomorphological studies discusses in this article. It is noted that modern sonar tools are an effective means of surveys. Morphometric «picture», which can be obtained by using sonar survey of the bottom, will allow a detailed analysis of the heterogeneity of the geological structure of the seabed for determination the nature of tectonic movements and the degree of exposure to exogenous relief-forming processes.*

*Key words: sonar survey, side scan sonar, microrelief, sonar image.*

Изучение рельефа и грунта дна Ладожского озера является одним из важнейших направлений лимнологических исследований. Как отмечается в [5], «Термический и динамический режимы озера наряду с климатическими особенностями северо-запада России в значительной степени определяются морфометрическими характеристиками его котловины. Особую важность приобретает знание точных значений морфометрических характеристик для составления водного, теплового и химического баланса Ладожского озера». Современные методы изучения озёр базируются на создании их батиметрических моделей. Очевидно, что чем подробнее и достовернее модель, тем качественней основа для других направлений исследований.

Существующая батиметрическая модель Ладожского озера [5] построена на основе эквидистантной сетки с шагом  $0,5 \times 0,5$  км и в генеральном масштабе достаточно полно описывает рельеф дна озера. Однако для решения ряда задач, например, выявления локальных форм рельефа (обособленных впадин, гряд, скал и т.п.) и обнаружения донных объектов требуется получение более подробных отображений дна и его стратификации донных отложений.

Особое значение приобретает проведение комплексных детальных гидрографических исследований с целью изучения сейсмически активных районов северной части Ладожского озера, выявления природы, происходящих в них аномальных процессов [4].

Сейсмически активные районы (зоны разломов земной коры) крупных озёр изучены не достаточно. Разломы — это зоны концентрации тектонических напряжений и повышенных деформаций породного массива. Считается, что перенапряженная зона разлома порождает электромагнитное поле. Помимо этого, вследствие повышенной трещиноватости тектонический разлом, в большинстве случаев, представляет собой водоносную зону. Совершенно очевидно, что движение подземных вод с растворенными в них солями (проводника) через толщу пород (которые отличаются по своим электрическим свойствам) может формировать и формирует электрические поля и аномалии. В результате всех этих явлений в зонах динамического влияния разрывных нарушений наблюдается разуплотнение и оседание несущих грунтов, инфильтрация поверхностных загрязнителей в водоносные горизонты питьевого назначения, формирование ландшафтных аномалий с высокими концентрациями химических элементов и веществ различных классов опасности на геохимических барьерах. Именно поэтому в зонах тектонических разломов зачастую наблюдаются аномалии различных природных физических полей [2, 11].

Для обнаружения активности разлома используют комплекс геолого-геоморфологических, геофизических и геодезических методов. Наиболее широко применяют геолого-геоморфологические методы, позволяющие выявить смещения и деформации в зоне разлома молодых отложений и форм рельефа: русел, морских и речных террас [1].

Морфометрическая «картина», которая может быть получена с помощью гидролокационного обследования дна, позволяет провести подробный анализ неоднородности геологического строения дна для определения характера тектонических движений и степени воздействия экзогенных рельефообразующих процессов. Каждый процесс создает специфичные, только ему свойственные формы и комплексы форм рельефа. Таким образом, без проведения детального гидролокационного обследования зон возможных разломов изучение процессов и явлений, происходящих в них, будет далеко не полным.

Современное развитие гидроакустической техники (многолучевых эхолотов, профилографов, гидролокаторов) позволяют формулировать и успешно решать задачи обследования не только значительных по своим размерам форм рельефа дна (гряды, холмы и т.п.), но и малоразмерных, что представляет существенный интерес для изучения геоморфологических особенностей дна Ладожского озера. Это предполагает выполнение детальной съёмки со сплошным покрытием (без пропусков) выбранных участков дна. Ярким результативным примером использования такой съёмки является обнаружение траекторий движения подводных оползней в Женевском озере [10].

Поэтому гидролокационное обследование дна можно считать одним из основных составляющих геоморфологических исследований.

### Район исследования

Детальное гидролокационное обследование процесс достаточно трудоёмкий и затратный по времени. Технология съёмки требует тщательной проработки, а место проведения должно выбираться в наиболее проблемных, важных с научной точки зрения районах озера. «К ним можно отнести участки резко расчленённого рельефа в северной части озера, где уклоны склонов могут превышать  $5^\circ$ . Для подводного рельефа указанные значения характеризуют довольно крутые склоны, которые встречаются редко. Их наличие является свидетельством того, что рельеф сложен породами (или выработан в породах) плохо поддающимися размыву» [1, 3, 6].

Район юго-западного берега острова Валаам, между мысом Никоновским и островом Малым, характеризуется значительной изрезанностью и резким перепадом глубин (см. рис. 1).

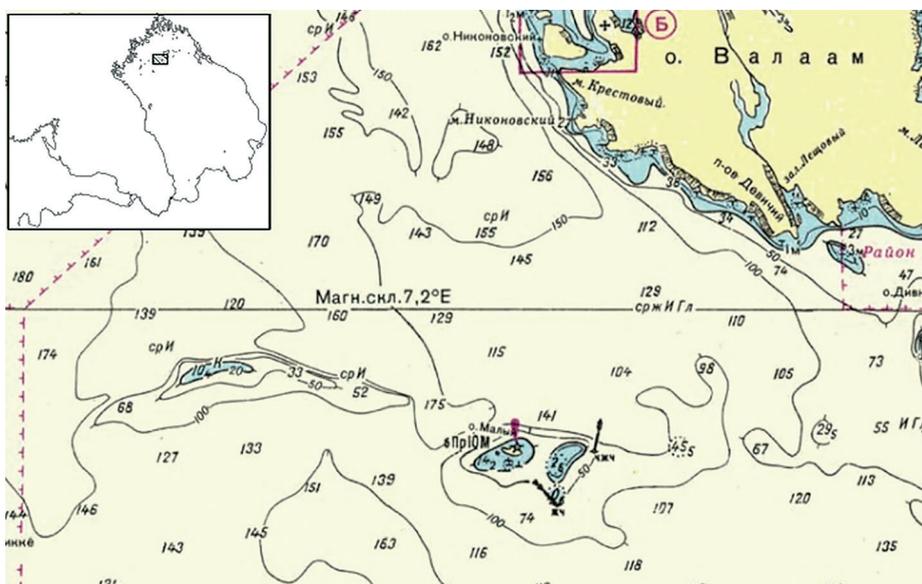


Рис. 1. Выбранный участок обследования дна

Была создана батиметрическая модель выбранного района с пространственным разрешением  $150 \times 150$  м. На её основе на рис. 2 представлено пространственное распределение глубин выбранного района.

Характерные разрезы указывают на значительные уклоны дна прибрежной зоны острова Валаам и острова Малый, величины уклонов составляют  $16\text{--}18^\circ$ , что даёт в среднем увеличение глубины на 1 м при удалении от берега на каждые 3 м. Разрез глубин Е–Е' свидетельствует, что подъём дна вдоль подводной долины с востока на запад незначительный. Глубины увеличиваются 150 м до 50 м на расстоянии в 8 км (1:80).

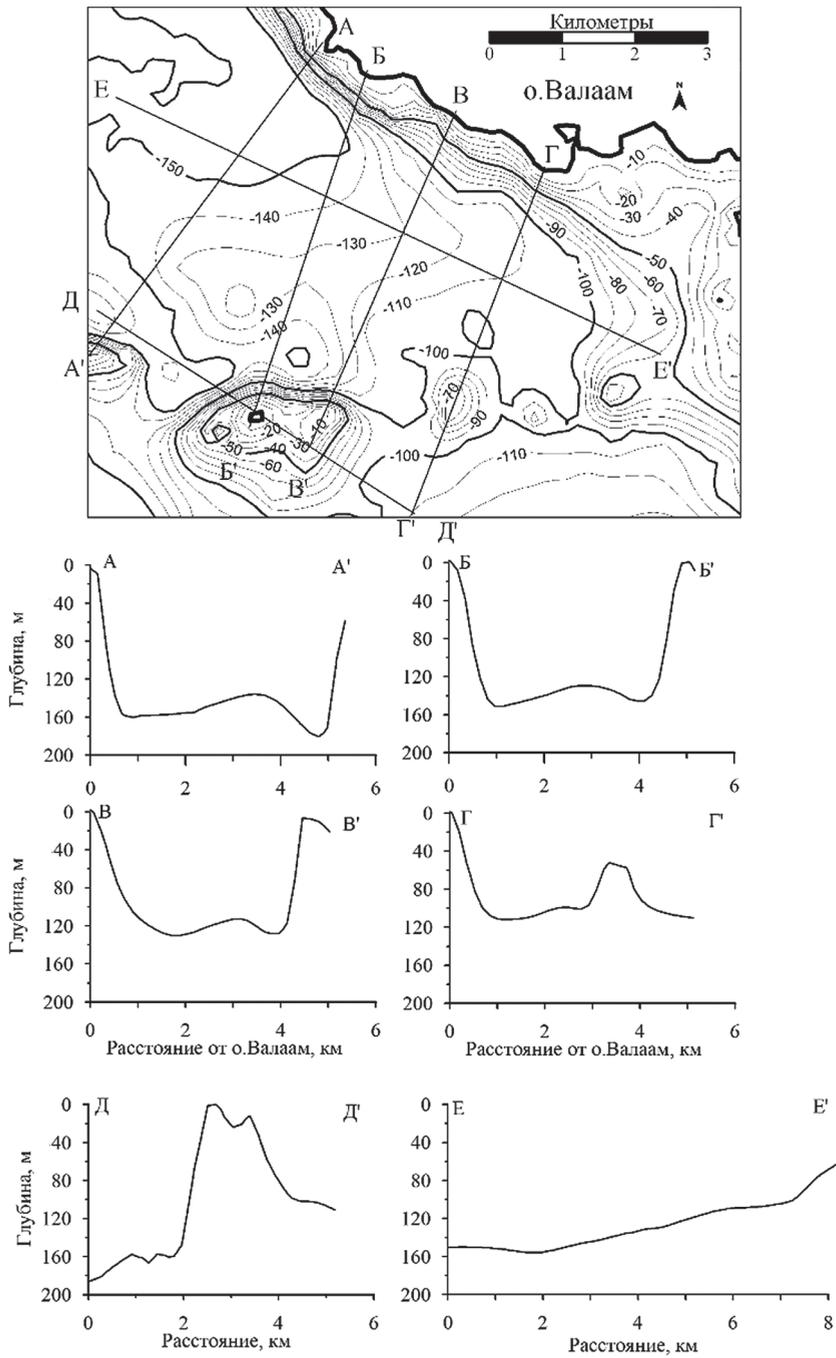


Рис. 2. Морфометрические характеристики выбранного участка дна

*Средства, методика и особенности гидролокационной съёмки*

В качестве средств для гидролокационного обследования используются гидролокатор StuctureScan (LSS-1) и эхолот Lowrance серии HDS [7, 8], совмещенные с геопозиционной системой (GPS). Основные технические характеристики этих средств представлены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

**Основные технические характеристики гидролокатора StuctureScan (LSS-1)**

Рабочая частота, кГц	455	800
Дальность (наклонная), м	150	90
Максимальная глубина, м	90	30
Оптимальная скорость, узл.	10 и менее	
Предельно допустимый интервал распознавания объекта, см	3,8	

Таблица 2

**Основные технические характеристики эхолота Lowrance серии HDS**

Рабочая частота, кГц	50/200	80/200
Максимальная глубина, м	1520	
Длительность записи эхолота на встроенную память	от 10 мин до 2 ч	

Учитывая, что получение информации о микрорельефе дна планируется проведением гидролокационного обследования района, основным средством съёмки выступает гидролокатор StuctureScan (LSS-1), однако целесообразно использовать и эхолот.

Рассматривая общие вопросы технологии использования гидролокатора можно отметить, что обследование системой прямых параллельных галсов остаётся наиболее эффективным методом обследования. Для минимизации отклонения антенны гидролокатора от линии заданного пути направление галсов при запланированной малой скорости движения плавсредства выбирается наиболее близко к направлению преобладающих в районе течений. Когда течения не известны или их влияние существенное, обследование производится параллельно преобладающему направлению изобат. Это позволяет выдерживать заданную ширину полос обследования в районах с существенным склоном дна.

При исследовании микрорельефа, по-видимому, нет необходимости обеспечивать гарантированное сплошное покрытие и тем самым выдерживать постоянные междугалсовые расстояния. Однако для повышения степени достоверности полученных данных и удобства последующей обработки материалов желательно выдерживать междугалсовые расстояния, рассчитываемыми в соответствии со шкалой дальности работы гидролокатора. Желательно, чтобы соседние галсы перекрывали зоны возможных пропусков.

В данном случае важнее выдерживать расчётную скорость плавсредства. Она должна надёжно обеспечивать обнаружение форм микрорельефа определённых размеров и

ограничивается необходимостью получения достаточного числа ответных импульсов от облучаемого объекта (не менее 4–5). Скорость ( $V$ ), которую не следует превышать, чтобы форма рельефа определённой протяжённости (за протяжённость принимается длина формы, измеренная по нормали к акустическому лучу) была уверенно обнаружена с двух соседних галсов определяется по формуле [9]:

$$V = \frac{L + Bw}{tN},$$
$$t = \frac{1}{F}, \quad F = \frac{C}{2Rm}, \quad Bw = Rs \cdot \varphi, \quad (1)$$

где  $t$  — период следования импульсов, с;  $N$  — количество импульсов облучаемых объект;  $F$  — частота следования импульсов, имп/с;  $V$  — скорость судна относительно дна, м/с;  $C$  — скорость распространения звука в воде, м/с;  $Rm$  — диапазон шкалы записи, м;  $Bw$  — ширина пятна облучения в горизонтальной плоскости, м;  $Rs$  — наклонная дальность до объекта, м;  $\varphi$  — угол излучения ГБО в горизонтальной плоскости, рад.

Принимая подлежащие обследованию допустимые размеры форм микрорельефа не более 1 м, скорость движения, теоретически, согласно формуле (1) при  $t = 0,5$  с и  $\varphi = 1^\circ$  не должна превышать 1,45–1,81 м/с (5,2–6,3 км/ч). При этом необходимо помнить, что в расчёт не принимаются реальные условия распространения акустических волн и технические недостатки оборудования. На практике возможность обнаружения определяется также силой отражённого от объекта сигнала и другими факторами, связанными с гидрологическими характеристиками, рельефом дна и составом грунта.

Стабильность отображения микрорельефа в основном зависит от постоянства курса и скорости движения на съёмочном галсе.

Следует также помнить, что непосредственно под антенной гидролокатора имеется так называемая «ближняя зона», которая находится вне лепестка основного излучения. Размер зоны обусловлен высотой антенны излучателя над дном. Реальная картина дна в этой зоне отображается с искажениями. Ширина зоны невелика, тем не менее, целесообразно предусматривать перекрытие этой зоны с соседних галсов.

В горизонтальной плоскости в «ближней зоне» могут также возникать промежутки между отдельными импульсами. Величина этих промежутков зависит от скорости движения и частоты повторения импульсов. За ближней зоной распространение лучей исключает эти промежутки и обеспечивает полное покрытие. Поэтому небольшие формы микрорельефа, с большей вероятностью, могут быть пропущены, находясь ближе к антенне, чем на большем удалении от неё.

Для упрощения расчётов обычно делается предположение, что антенна гидролокатора перемещается стабильно, хотя несомненно постоянно происходят некоторые колебания по крену и дифференту и рысканье. Вероятно, в вертикальной плоскости крен мало влияет на акустическое изображение будучи компенсированным широким углом излучения. Более значимы крен и рысканье в горизонтальной плоскости, где ширина луча узкая, и они могут снизить вероятность обнаружения малых форм рельефа. Объект, который облучается при стабильном положении ГБО, как минимум,

5 импульсами при колебаниях в каждой из этих плоскостей может быть облучён только 4 или даже 3 импульсами.

Основным источником помех при работе гидролокатора служат донная реверберация, которая зависит от характера грунта (ил, песок, скала) и от угла скольжения акустического луча по грунту, резко возрастающая с его увеличением. Помехоустойчивость гидролокатора зависит также от размеров площадки, «высвечиваемой» акустическим лучом на грунте: чем больше площадь этой площадки, тем уровень помех выше.

На мелководье влияние поверхностного шума (волны, кильватерная струя) ухудшает работу гидролокатора, особенно это проявляется при расположении антенны близко к поверхности воды.

При штиле и движении антенны на небольшом заглублении может возникнуть эффект отражения части акустической энергии от поверхности воды. Это явление известно под названием «Отражение Ллойда» (LloydMirror) и проявляется в чередовании серии минимумов и максимумов акустического изображения. Если позволяют глубины, эффект может быть минимизирован заглублением антенны.

Эффект «перекрёстной наводки» (CrossTalk) между двумя каналами (бортами) гидролокатора также может иметь место. Он проявляется в зеркальном отображении форм микрорельефа с одного канала на другом, но как правило, менее чётко. Эффект опасен тем, что может затемнить истинное отображение рельефа дна другим бортом и привести к ложному отображению или вовсе препятствовать отображению микрорельефа.

Важную роль в выявлении характера микрорельефа несомненно будет играть качество обработки и анализ полученных гидроакустических изображений. Следует иметь в виду, что они не представляют изометрическую картину дна и при интерпретации мозаики изображений, особо проявляющейся в зонах тени, должны учитываться различные искажающие факторы. К ним, в первую очередь, можно отнести:

- сжатие изображения, возникающее с увеличением скорости движения носителя (искажение параллельно курсу из-за нарушения соответствия скорости перемещения антенны гидролокатора и скорости записи гидролокационного изображения);
- боковое искажение, вызываемое нестабильностью траектории перемещения антенны гидролокатора над дном;
- искажения, связанные с наклоном дна (проявляются в направлении перпендикулярном движению гидролокатора со стороны наклона дна).

Например, при движении антенны гидролокатора с креном на один борт, канал этого борта будет получать более сильный ответный сигнал и тем самым изображение дна будет более тёмным чем с другого борта. Поскольку расшифровка изображения основывается на интерпретации теневой картины, т.е. на относительной силе ответного сигнала от различных типов грунта, то наличие крена может вызвать сложности в решении этой задачи.

При обработке гидролокационного изображения для оценки размеров форм микрорельефа рекомендуется:

- величину тени определять с обеих сторон исследуемой формы и результаты усреднять для уменьшения погрешности за счёт наклона дна;

- измерения длины и ширины форм рельефа выполнять перпендикулярно направлению движения гидролокатора и корректировать с учётом неточности измерения наклонного расстояния.

Превышение объекта над дном ( $H$ ) может быть определена по формуле:

$$H = \frac{S \cdot h}{R + S}, \quad (2)$$

где  $S$  — длина гидроакустической тени;  $R$  — наклонная дальность;  $h$  — высота антенны гидролокатора над дном.

Представленные в статье некоторые практические рекомендации по выполнению гидролокационного обследования основаны на опыте практических работ и могут служить в качестве основы при планировании и выполнении геоморфологических исследований Ладожского озера.

### Литература

1. *Амантов А.В., Спиридонов М.А.* Геология Ладожского озера. // Сов. геология, 1989, № 4, с. 81–86.
2. *Алехин В.И.* Разломы земной коры как зоны экологического риска. // Эл. журнал «Проблемы экологии», 2004, № 1–2. — 172 с.
3. Атлас «Ладожское озеро». — СПб.: ИНОЗ РАН, 2002. — 128 с.
4. *Боков В.Н., Воробьев В.Н., Карлин Л.Н.* Атмосферные вихри и сейсмичность на Ладоге. // Учёные записки РГГМУ, 2013, № 30, с. 41–49.
5. *Науменко М.А.* Анализ морфометрических характеристик подводного рельефа Ладожского озера на основе цифровой модели. // Известия РАН. Серия географическая, 2013, № 1, с. 62–72.
6. *Субетто Д.А.* Донные отложения озер: Палеолимнологические реконструкции. — СПб.: изд. РГПУ им. А.И. Герцена, 2009. — 336 с.
7. Руководство по эксплуатации гидролокатора LOWRENCE® StructureScan™ Sonar Imaging. — Navico, 2009. — 20 с.
8. Эхолота-навигатор серии HDS. Руководство по эксплуатации. — Электронный ресурс: [<http://www.navionika.com/media/manuals/hds5-7-8-10.pdf>].
9. Manual on Hydrography. Final Draft. ИНВ. Jan. 2005.
10. *Sastre V., Loizeau J.-L., Greinert J., Naudts L., Arpagaus P., Anselmetti F., Wildi W.* Morphology and recent history of the Rhone River Delta in Lake Geneva (Switzerland). // Swiss Journal of Geosciences (Impact Factor: 1.29), 2010, vol. 103(1), pp. 33–42. — DOI: 10.1007/s00015-010-0006-4.
11. Электронный ресурс: [<http://www.374.ru/index.php?x=2007-09-12-50>].