

DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-1-17-36

MODERN DIGITAL HYDROGRAPHY AND THE NEW INTERNATIONAL HYDROGRAPHIC ORGANISATION BATHYMETRIC SURVEY STANDARDS

Yu. G. Firsov

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

The current state of the International Hydrographic organization bathymetric survey Standards S44 (6.1.0) is examined in this study. The introduction of the S44 survey Standards fourth edition in 1998 heralded the beginning of a new era of modern digital hydrography based on the concept of the survey orders resulting from implementation of the Global Navigation Satellite Systems of positioning and hydrographic information systems. The fundamental changes between the 4th and 6th editions of the Standards for Hydrographic Surveys (S-44) are described. The differences between the 5th and 6th editions of the Standards for Hydrographic Surveys (S-44) are evaluated. Particular attention is paid to the conceptual evolution of such definitions as “bathymetric model” and “features detection”. The main new S44 (6.1.0) survey Standards paradigm became the concept of “bathymetric coverage” and the rejection of the “full sea floor coverage” concept which was introduced in the previous 5th edition. Introducing the “bathymetric coverage” and “feature search” notions in the 6th S44 (2022) survey Standards provides the possibility to avoid the implementation of such previously important hydrographic definition as “line spacing”. It is especially emphasized that the introduction and combined application of such definitions as “bathymetric coverage”, “feature detection” and “feature search” necessitate the usage in the 6th S44 (2022) survey Standards of the new special tool named “specification matrix”. This tool is important for hydrographic survey drafting taking into consideration the various stakeholder requirements as well as providing a short hydrographic survey description. The introduction of gridding concept in hydrography provided in the S44 (6.1.0) survey Standards for the first time is also mentioned. Critical comments on the interpretation of gridding methods provided in the annex D which are not considered as the part of the Standards are presented. Some recommendations concerning general quality control requirements and survey posteriori quality control provided in the annex C and B are also commented on. It should be especially emphasized that three last editions of S44 Standards use the “standard deviation” term without specifying its confidence level for position uncertainty (Total Horizontal Uncertainty — THU) calculation. The position uncertainty (2D) quantities are stated as “standard deviation” multiplied by coefficient 2.45. The “standard deviation” term needs additional explanation and clarification; it should not be confused with the widely used term «position standard deviation = distance root mean squared». It is also pointed out the insufficient study of the 3D hydrographic technology provisions presented in the 6th S44 survey Standards edition associated with the alternative method of sea level correction determination based on the precise ellipsoid (geodetic) heights measurements of the tide gauges benchmarks and chart datum using GNSS observations. The necessity of inclusion of the requirements for survey posteriori quality control as the result of survey data post-processing, using statistical comparison of check lines crossing the regular lines, is substantiated. Finally, the urgency of developing new Russian hydrographic standards and specifications based on IHO S44 (6.1.0) on the basis of modern technology is emphasized.

Keywords: Digital hydrography, IHO Standards for Hydrographic Surveys (S-44), bathymetric model, bathymetric coverage, standard deviation, uncertainty, Total Horizontal Uncertainty, Total Vertical Uncertainty, a priori uncertainty model, posteriori model, sea floor significant features, feature detection, feature search, specification matrix.

For citation:

Firsov, Yury G. “Modern digital hydrography and the new International Hydrographic Organization bathymetric survey Standards.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 16.1 (2024): 17–36. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-1-17-36.

УДК 551.462.33(268)

СОВРЕМЕННАЯ ЦИФРОВАЯ ГИДРОГРАФИЯ И ТРЕБОВАНИЯ НОВЫХ МЕЖДУНАРОДНЫХ СТАНДАРТОВ ДЛЯ БАТИМЕТРИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ

Ю. Г. Фирсов

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Рассмотрены вопросы современного состояния и стандартизации батиметрической съемки, регламентируемые Международной гидрографической организацией. Отмечается, что четвертая редакция Стандартов S-44 явилась «революционной», ознаменовав собой начало эры современной электронной гидрографии, основанной на понятии «категорий съемки рельефа», обусловленной новыми возможностями глобальных навигационных спутниковых систем и электронных гидрографических информационных систем. Дана характеристика изменений, внесенных в Стандарт S-44, с 4-й (1998 г.) по 6-ю (2022 г.) редакции. Проанализированы основные отличия 5-й редакции (2008 г.) и уточненной 6-й версии редакции (2022 г.). Особое внимание уделено вопросу эволюции понятий «батиметрическая модель» и «обнаружение объектов». Указано, что основой новой парадигмы Стандартов S-44 является требование «батиметрического покрытия» и отказ от понятия «полное обследование морского дна», впервые введенного в 5-й редакции S-44. В результате введения понятий «батиметрическое покрытие» и «обнаружение объектов» в 6-й редакции S-44 впервые оказалось возможным отказаться от такого важного гидрографического параметра, как подробность промера («междугалсовое расстояние»). Подчеркивается, что совместное применение понятий «батиметрическое покрытие», «обнаружение объектов» и «поиск объектов» привело к необходимости использования в 6-й редакции S-44 такого нового инструмента для проектирования и формирования краткой характеристики съемки, как «матрица спецификаций». Отмечается, что в 6-й редакции S-44 впервые введено понятие «батиметрическая модель», связанное с гридом (регулярной сеткой глубин). Даны критические комментарии к сведениям об использовании сеточных батиметрических моделей, приведенных в приложениях, не являющихся частью S-44(6.1). Проанализированы предложения по формированию апостериорной модели неопределенностей результатов съемки рельефа дна, актуальной для площадной съемки с использованием многолучевых сонаров, необходимые для подтверждения выполнения заданной категории S-44. Указано, что в трех последних редакциях S-44 для оценки планового положения использован термин «стандартное отклонение» без конкретного указания связанной с ним доверительной вероятности. Это требует дополнительных пояснений и уточнений в части рекомендации, касающейся применения коэффициента 2,45 для расчета величины суммарной горизонтальной неопределенности. Обращается внимание на недостаточную проработку в 6-й редакции S-44 вопросов, связанных с альтернативным способом определения поправок уровня на основе высокоточного определения высот нулей глубин в геоцентрической системе координат. Обоснована необходимость включения в последующую редакцию S-44 спецификаций по контролю качества результатов площадной батиметрической съемки. Отмечается отсутствие новых российских спецификаций выполнения гидрографических съемок, основанных на Стандартах S-44 Международной гидрографической организации, и необходимость их разработки, согласования и утверждения.

Ключевые слова: электронная гидрография, Стандарты S-44 МГО, батиметрическое покрытие, неопределенность изменений, априорные модели неопределенностей, апостериорные модели неопределенностей, существенные объекты на дне, поиск объектов, матрица спецификаций.

Для цитирования:

Фирсов Ю. Г. Современная цифровая гидрография и требования новых международных стандартов для батиметрической съемки / Ю. Г. Фирсов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 1. — С. 17–36. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-1-17-36.

Введение (Introduction)

Последнее десятилетие XX в. ознаменовано радикальным изменением гидрографических технологий благодаря внедрению в практику трехмерного высокоточного позиционирования на основе глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), многолучевых эхолотов (МЛЭ) и новых персональных компьютеров с графическими мониторами. Все это явилось основой для разработки электронных гидрографических информационных систем (ЭГИС), определивших новое научно-прикладное направление — современную электронную гидрографию как один из разделов геоматики — научно-технического направления, объединяющего методы и средства интеграции информационных технологий сбора, обработки и использования пространственных данных, включая геоинформационные технологии [1].

Появление нового научно-практического направления — электронной гидрографии — потребовало нормативного обеспечения, исторически возложенного на Международную гидрографическую организацию, которая с 1968 г. занималась подготовкой специальных публикаций S-44 — стандартов на гидрографическую съемку. Первые три стандарта, появившиеся

в 1968, 1983 и 1988 гг., были во многом схожи, поскольку отражали уровень развития гидрографических технологий второй половины XX в. Однако появление в 1998 г. 4-й редакции Стандарта S-44 существенно изменило требования к гидрографической съемке, отражая новые возможности гидрографии, которая стала *электронной и цифровой*.

Стандарты на гидрографическую съемку Международной гидрографической организации (МГО) изначально не имели статуса нормативного документа, но формировали минимальные стандарты точности съемок, которые следовало выполнять государствам для подготовки навигационных морских карт (НМК) в целях обеспечения безопасности мореплавания в соответствии с требованиями Конвенции СОЛАС-74. В 4-й редакции Стандарта S-44 сделана первая попытка обобщить опыт использования новых средств и методов новой цифровой гидрографии. В этом документе были представлены новые парадигмы цифровой гидрографии, которые получили развитие в последующих редакциях Стандарта 2008 г. (5-я редакция), а также в 2020 и 2022 гг. (редакции 6.0.0 и 6.1.0).

Целью статьи является анализ основных положений последних трех редакций Стандартов S-44, исследование эволюции норм и рекомендаций, изложенных в этих документах, а также оценка новых изменений, которые появились в 6-й редакции Стандарта (сентябрь 2022 г.).

Выполненное исследование основано на изучении текстов трех редакций Стандартов S-44 и сопутствующих этим стандартам российских и зарубежных публикаций. Использован также личный опыт автора по эксплуатации многолучевых эхолотов с ЭГИС Нураск (фирма НУРАСК) и QINSy / Qimera (фирма Quality Positioning Services), включающий предоставление заказчику окончательных результатов в соответствии с требованиями 5-й редакции Стандарта S-44. Кроме того, учитывался опыт изложения основных положений Стандартов S-44 в процессе преподавания дисциплины «Гидрография» в ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова. Предполагается, что анализ положений 6-й редакции Стандарта S-44 может быть полезен при подготовке нового отечественного нормативного документа по современной гидрографии.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Отличительной особенностью современной гидрографии является ее международный характер, что связано с необходимостью создания различными государствами равноценных по точности и надежности НМК. Стремительное развитие средств и методов гидрографии, внедрение в практику современного мореплавания морских электронных карт определяют необходимость решения вопросов унификации требований при проведении гидрографических съемок. «Стандарты МГО на гидрографические съемки» (IHO Standards for Hydrographic Survey) выходят в виде специальной публикации МГО № 44 (Special Publication 44), более известной как документ S-44. Первое издание стандарта было опубликовано в 1968 г. с последующими переизданиями в 1982 г. (2-я редакция) и в 1987 г. (3-я редакция).

Необходимо отметить, что стандарты рассматривались исключительно как документы, применяемые на добровольной основе, содержащие общие рекомендации и определяющие минимальные требования к качеству проведения гидрографических съемок для стран — членов МГО, а также других стран, выполняющих данные работы в зонах своей ответственности. Предполагалось, что на основе стандартов МГО страны — члены МГО будут разрабатывать свои национальные стандарты выполнения гидрографических съемок, учитывающие специфические особенности акваторий и исторически сложившиеся методические особенности выполнения работ. Первые три редакции документа S-44 идеологически были во многом схожи, поскольку касались выполнения гидрографических съемок, направленных на создание НМК. При этом масштабы съемок увязывались с текущими потребностями судоходства, глубинами моря на основных судоходных трассах, а также доступными в то время средствами высокоточного определения координат при проведении гидрографических работ. В предыдущем издании стандарта S-44 (1987 г.) основное внимание было сосредоточено на классификации точностей для гидрографических съемок, проводимых для составления НМК.

В настоящее время существует осознание того, что пользователи гидрографических данных составляют намного более разнообразную и обширную по своему составу группу, чем представлялось ранее. На новом этапе научно-технического прогресса в области морской навигации и гидрографии в начале 90-х гг. XX в. возникла необходимость создания очередной 4-й редакции стандартов S-44. Для этого в 1993 г. была создана рабочая группа, состоящая из представителей тринадцати государств — членов МГО. Группе было поручено дать рекомендации для формирования новой редакции, учитывающей развитие новых спутниковых средств определения местоположения (Навстар / ГЛОНАСС), прогресс в создании мелководных многолучевых эхолотов и их внедрение в практику гидрографических работ, а также появление мощных и бюджетных компьютеров. В связи с этим в новых Стандартах S-44 (4-я редакция (1998 г.))¹ основной акцент сделан на оценке точности данных, полученных в результате проведения гидрографических работ, а также предоставления потенциальным пользователям метаданных, касающихся дополнительной разносторонней информации, позволяющей впоследствии использовать материалы гидрографических работ для других целей.

Главные нововведения 4-й редакции Стандартов S-44:

- обоснование четырех категорий (orders) гидрографической съемки;
- введение понятия *суммарной перенесенной ошибки* (Total Propagated Error (TPE));
- стандарты, в которых впервые был сформулирован вопрос о том, что с помощью суммарной перенесенной ошибки (СПО) необходимо охарактеризовать положение глубины на дне с учетом всех составляющих ошибок, включая также размер следа луча эхолота на дне;
- рекомендации по регистрации не только результатов съемки, но и оценки точности получаемых величин на уровне 95 %-й доверительной вероятности;
- введение принципа 100 %-го обследования дна;
- введение понятия *обнаружения объектов на дне*;
- наличие рекомендации по регистрации метаданных съемок и их представлению в цифровой форме совместно с результатами съемки.

Главным отличием 4-й редакции Стандартов S-44 явилось введение категорий гидрографических съемок в зависимости от важности района их проведения для безопасности надводного мореплавания. В зависимости от категории съемки устанавливались точность определения планового положения глубины на морском дне и точность исправленной глубины. При этом, в отличие от более ранних редакций Стандартов S-44, в 4-й редакции полностью исключалась зависимость между *точностью гидрографических измерений* и *масштабом съемки*. Все гидрографические съемки разделены на четыре категории в соответствии с предполагаемыми пользователями получаемой информации. Данная редакция определяла для каждой из указанных категорий точность планового положения (на 95 %-м уровне доверительной вероятности), точность глубин (на 95 %-м уровне доверительной вероятности), соблюдение требования 100 %-го обследования дна, способность системы съемки по обнаружению подводных объектов, потенциально опасных для навигации (экзогенных и техногенных), и максимальную подробность промера (для съемки с однолучевыми эхолотами).

Неопределенность измерения глубины была разделена на две составляющие: *постоянную* и *переменную* (зависящую от глубины), а точность глубины следовало понимать как *точность исправленной глубины*. При этом полагалось, что все источники погрешностей должны быть изучены и определены поправки, исключаяющие систематические ошибки, а точность полученных поправок должна быть учтена при получении СПО (TPE). В табл. 1, являющейся основой 4-й редакции Стандартов S-44, в краткой форме изложены основные требования к точностным характеристикам четырех нормированных категорий гидрографической съемки и приведена основополагающая формула для расчета допустимых ошибок.

¹ IHO Standards for Hydrographic Surveys. Special Publication № 44. 4th Edition. Monaco: International Hydrographic Bureau, 1998. 23 p.

Введение 4-й редакции Стандарта S-44 активно обсуждалось в зарубежной специальной литературе [1]–[3], а также в отечественных публикациях [4], [5]. В частности, в публикации [5] отмечается, что рекомендации по точности исправленных глубин по S-44 (1998 г.) в 2 раза выше, чем в отечественном нормативном документе ПГС-4, ч. 2, а также производных руководящих документах (РД)¹ и Своде правил по инженерно-геодезическим изысканиям для строительства (СП)². Дополнительная информация по этому вопросу приводится в работе [6].

В ряде публикаций отмечен ряд недостатков новых Стандартов S-44 (1998 г.), к которым можно отнести следующие.

1. Большинство новых терминов, использованных в тексте S-44 (1998 г.), не были четко определены.

2. Введено понятие «батиметрическая модель», но не показан ее смысл, отсутствует методика создания и использования.

3. В составе данных съемки рекомендовалось регистрировать априорные и апостериорные погрешности. Формирование априорных погрешностей было понятно большинству специалистов, ознакомившихся с публикацией [7], однако методика получения апостериорных погрешностей глубин осталась без разъяснения.

4. Пояснения по пересчету погрешностей положения с 63 %-м уровнем доверительной вероятности в погрешность положения с 95 %-м уровнем доверительной вероятности отсутствовали.

5. Не определен состав метаданных съемки.

В S-44 (1998 г.) отмечено, что гидрографические съемки выполняются для широкого круга задач, не связанных с обеспечением безопасности мореплавания (издания НМК), но требования необходимой точности исправленных глубин для этих участников морской деятельности не представлены.

Термин «СПО» (TPE) не был конкретизирован, что привело к его неоднозначному толкованию как априорной оценки точности планового и высотного положения отметки глубины на дне, рассчитанного на основе составляющих погрешностей на уровне 95 %-й доверительной вероятности. При этом подразумевалось, что грубые погрешности измерений устранены, систематические ошибки отсутствуют, а случайные погрешности подчиняются нормальному закону распределения. Учет влияния систематических ошибок в Стандарте S-44 не рассматривался. Отмечалась необходимость выполнения контрольных галсов, но сравнение глубин в точках пересечения основных и контрольных галсов не было нормировано. Ряд терминов Стандарта S-44 (1998 г.) был приведен без детализации и комментариев, а ссылки на Гидрографический словарь МГО (специальная публикация S-32)³ не могли помочь ввиду отсутствия в нем новой терминологии.

В Стандарте S-44 (1998 г.) не удалось учесть всех тех преимуществ, которые предоставляет современная площадная съемка рельефа дна. Использование МЛЭ было представлено в самом общем виде без конкретных рекомендаций и пояснений. В частности, остались нераскрытыми такие вопросы, как ширина полосы обзора, необходимое перекрытие смежных полос обзора, совместное использование МЛЭ и гидролокатора бокового обзора (ГБО), а также применение авиационных лазерных батиметрических систем (LIDAR).

Введение 4-й редакции Стандарта S-44 явилось значительным событием в цифровой гидрографии. Новая концепция, связанная с введением категорий *съемки* и *отказ от сопоставления точности планового положения глубин с масштабом планшета*, несомненно, открыла новую веху для всех направлений гидрографической деятельности. Следует отметить, что многочисленные национальные нормативные документы, касающиеся разных сторон гидрографической деятельности, появившиеся в начале XXI в., использовали эту новую концепцию.

¹ РД 31.74.04–2002. Технология промерных работ при производстве дноуглубительных работ и при контроле глубин для безопасности плавания судов в морских портах и на подходах к ним. Ростов н /Д, 2004. 154 с.

² СП 11-104-97. Инженерно-геодезические изыскания для строительства. Ч. III: Инженерно-гидрографические работы при инженерных изысканиях для строительства». М.: ФГУП «ПНИИИС», 2004. 106 с.

³ Hydrographic Dictionary. Part 1. Volume 1. English. Special Publication No 32. 5th Edition. Monaco, 1994. 280 p.

Работа над новой 5-й редакцией Стандарта S-44 началась в 2006 г. Для создания проекта была сформирована рабочая группа в составе 32 экспертов. В сентябре 2007 г. в Финляндии было проведено очередное заседание рабочей группы и принят проект, который был разослан всем странам — членам МГО с целью внесения замечаний и предложений. Первоначально предполагалось, что новая редакция S-44 (2008 г.) должна давать указания для выполнения гидрографических работ не только в целях составления морских карт, но и для обеспечения другой морской деятельности, однако эти надежды не оправдались. В действительности, S-44 (2008 г.) по-прежнему представлял собой стандарт для съемок только в интересах безопасности надводного мореплавания, о чем было сразу заявлено¹. По сравнению с 4-й редакцией в Стандарт S-44 (2008 г.) были внесены следующие существенные изменения:

1) ликвидирована 3-я категория съемки для районов с глубинами свыше 200 м; количество категорий съемки сохранено (четыре), но первая категория S-44 (1998 г.) была разделена на две: *1a* и *1b*. Для категории *1a* предусмотрено полное обследование дна, для категории *1b* данное требование отсутствует;

2) особая категория съемки, в отличие от категории *1a*, не связана с характеристикой донного грунта, потенциально опасного для судов в случае касания дна;

3) в дополнение к термину СПО (TPE) введено подразделение суммарной перенесенной неопределенности на плановую (*Total Horizontal Uncertainty (THU)*) и высотную (*Total Vertical Uncertainty (TVU)*). При этом термин *Error* (ошибка) заменен новым термином *Uncertainty*;

4) в 5-й редакции S-44 был введен Словарь (*Glossary*), поясняющий используемую терминологию. В дальнейшем термины планировалось включить в публикацию МГО S-32²;

5) были введены два приложения: прил. А «Руководство по контролю качества» и прил. В «Руководство по обработке данных», которые в дальнейшем планировалось включить в учебник по гидрографии МГО — публикация М-13 (С-13, 2011 г.)³. Ряд ранее использованных в S-44(4) понятий получили четкие объяснения. Упомянутый в S-44 (1998 г.) термин «батиметрическая модель» (*Bathymetry Model*) был сохранен, но его взаимосвязь с известным термином «цифровая модель рельефа» (DTM) не была раскрыта. При этом появился новый важный термин: *Uncertainty Surface* (поверхность неопределенностей), в пояснении к которому впервые было использовано понятие «грид».

В табл. 1 данного исследования, которая является сутью проекта 5-й редакции Стандарта S-44 (2008 г.), в сжатой форме представлены основные требования к точностным характеристикам новых четырех категорий гидрографической съемки. Комментарии к 5-й редакции Стандарта S-44 даны в работе [8].

Комментарии по S-44 (2008 г.) и их сравнение с национальными нормативными гидрографическими документами были представлены в работах [8] [9]. В целом в 5-й редакции Стандартов, как отмечается в работе [8], особое внимание акцентировано на следующих вопросах:

1. 5-я редакция является «компромиссным» вариантом который, как правило, возможен, когда рабочая группа включает специалистов, имеющих разные подходы к решению новых проблем.

2. Впервые в гидрографический обиход была введена международная земная система отсчета ITRF (*International Terrestrial Reference Frame*), однозначно связанная с WGS84, а также рекомендовано фиксировать нули глубин в этой геоцентрической системе координат.

3. Больше внимание было уделено использованию МЛЭ. Для этого отдельно выделена категория *1a* с требованием полного обследования дна, но при этом отсутствовали различия между категориями *1a* и особой категорией по опасности, которое дно представляет для судов. В 4-й редакции S-44 отмечалось, что особая категория предполагает «жесткое дно», а категория *1a* — «мягкое дно» (песок, глина, ил).

¹ IHO Standards for Hydrographic Surveys. Special Publication № 44. 5th Edition. Monaco: International Hydrographic Bureau, 2008. — 28 p. DOI: 10.25607/OBP-1354.

² Hydrographic Dictionary. Part 1. Volume 1. English. Special Publication No 32. 5th Edition. Monaco, 1994. 280 p.

³ Manual on Hydrography. Publication C-13. 1st Edition. Monaco: International Hydrographic Bureau, 2011. 539 p. https://www.deparentis.com/wp-content/uploads/2020/04/IHO-Manual-on-Hydrography-1st-edition-February-2011-C-13_e1.0.0_ENG.pdf.

Таблица 1

**Основные требования к точностным характеристикам четырех категорий Стандарта S-44 (2008 г.).
Минимальные стандарты на гидрографические съемки¹**

Текст стандарта	Категория	Особая	Ia	Ib	2
Гл. 1	Описание районов	Районы, где глубина под килем имеет критическое значение	Районы с глубиной менее 100 м, где глубины под килем менее важны, но могут быть объекты, представляющие опасность для надводного мореплавания	Районы с глубинами менее 100 м, в которых глубины под килем не представляют опасности тому виду надводного мореплавания, который ожидается в этом районе	Районы с глубинами обычно более 100 м, где общее описание дна считается отвечающим требованиям
Гл. 2	Максимально допустимая THU с 95 %-м уровнем доверительной вероятности	2 м	5 м + 5 % глубины	5 м + 5 % глубины	20 м + 10 % глубины
§ 3.2, примечание 1	Максимально допустимая TVU с 95 %-м уровнем доверительной вероятности	$a = 0,25$ м $b = 0,0075$	$a = 0,5$ м $b = 0,013$	$a = 0,5$ м $b = 0,013$	$a = 1,0$ м $b = 0,023$
Словарь терминов	Полное обследование дна	Требуется	Требуется	Не требуется	Не требуется
§ 2.1, 3.4, 3.5, примечание 3	Обнаружение объектов	Кубические объекты более 1 м	Кубические объекты более 2 м на глубинах до 40 м; 10 % глубины на глубинах более 40 м	Не применяется	Не применяется
§ 3.6, примечание 4	Рекомендуемое максимальное межбуталсовое расстояние	Не определяется, необходимо полное обследование дна	Не определяется, так как требуется полное обследование дна	Три средних глубины или 25 м в зависимости от того, какое значение больше. Для лидаров интервал между точками 5 × 5 м	Четыре средних глубины
Гл. 2, примечание 5	Определение места стационарных СНО* и топографии, значимой для навигации (на 95 %-м уровне доверительной вероятности)	2 м	2 м	2 м	5 м
Гл. 2, примечание 5	Определение места береговой линии и топографии, менее значимой для навигации (на уровне 95 %-й доверительной вероятности)	10 м	20 м	20 м	20 м
Гл. 2, примечание 5	Среднее положение плавучих СНО* (на уровне 95 %-й доверительной вероятности)	10 м	10 м	10 м	20 м

*СНО — средства навигационного оборудования (Aids to Navigation).

¹ IHO Standards for Hydrographic Surveys. Special Publication № 44. 5th Edition. Monaco: International Hydrographic Bureau, 2008. С. 15.

4. Установлена максимальная глубина 40 м для особой категории, а также невозможность достижения 100 %-го акустического покрытия дна для двух категорий: *особой* и *Ia*, при использовании МЛЭ. Тем самым подтверждалась необходимость обязательного использования наряду с новейшими акустическими средствами площадного обследования гидрографического траления наиболее ответственных участков акватории (порты, причалы, подходные каналы с лимитирующими глубинами и т. п.).

5. Взамен параметра TPE (S44/4) вводилась TPU и дополнительно два других: THU и TVU. Однако при этом отсутствовали рекомендации по методике определения величин апостериорных оценок THU и TVU.

6. Введение категории съемки *Ib* решало вопрос возможности выполнения съемки рельефа с МЛЭ без «полного» акустического покрытия с расстоянием между краями полос обзора не более трех глубин.

7. В S-44 (2008 г.) впервые отмечалась важность таких мероприятий, как калибровки оборудования, сбор данных, проверочные процедуры (*Qualification Procedures*), формирование практического опыта гидрографа (*Surveyors' Skill*). Однако рекомендации по этим мероприятиям не были представлены.

8. В 4-й и 5-й редакциях Стандарта S-44 оставался нерешенным вопрос относительно правильного пересчета оценки точности планового положения в виде «стандартного отклонения» (*Standard Deviation*) с 63 %-м уровнем доверительной вероятности для перехода к оценке точности планового положения глубины на дне в виде THU (суммарной плановой *неопределенности*) с 95 %-м уровнем доверительной вероятности. Этот вопрос подробно рассмотрен в работе [10], а более детальные пояснения даны в разделе «Обсуждение» данной работы.

9. Во введении к 5-й редакции S-44 указано, что в Стандартах МГО должны фиксироваться *минимальные стандарты для выполнения съемки рельефа дна*, а национальные гидрографические службы должны разрабатывать *спецификации для съемки*, которые позволят обеспечивать достижение стандартов для каждой из категорий. С развитием гидрографических технологий спецификации могут изменяться, но минимальные стандарты будут неизменны в течение длительного периода времени.

Таким образом, 5-я редакция Стандарта S44 явилась конструктивным документом, отражающим достигнутый к 2008 г. уровень развития электронной гидрографии, и использовалась в качестве стандартов для гидрографических съемок в интересах создания морских навигационных карт до 2020 г. Основные положения Стандартов S-44 (2008 г.) использовались автором в процессе преподавания дисциплины «Гидрография» в ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова и были включены в учебные издания [11], [12].

Рассмотрим примечания 1–5 к табл. 1, выполненные в авторском переводе (выделены автором курсивом):

1. *Учитывая, что существуют как постоянные, так и зависящие от глубины неопределенности, влияющие на неопределенность глубин, для вычисления максимально допустимой TVU на уровне 95 %-й доверительной вероятности должна использоваться приведенная формула, в которую для вычисления максимально допустимой TVU для некоторой глубины необходимо ввести значения a и b , приведенные в табл. 1 для каждой категории съемки, а также глубину d :*

$$\pm \sqrt{a^2 + (b \times d)^2},$$

где a — величина, выражающая ту часть неопределенности, которая не изменяется в зависимости от глубины;

b — коэффициент, выражающий ту часть неопределенности, которая изменяется в зависимости от глубины, d — глубина;

$b \times d$ — величина, выражающая ту часть неопределенности, которая изменяется в зависимости от глубины.

2. В целях обеспечения гарантированной минимальной безопасной глубины под килем по всему району для *особой* и *Ia* категорий съемки может быть использован правильно настроенный механический трал (*Mechanical Sweep*).

3. Кубический объект означает правильный куб с ребрами одинаковой длины. Необходимо отметить, что в качестве минимальных требований для особой и 1а категорий съемки требуется обеспечить обнаружение кубических объектов с размерами 1 м и 2 м соответственно. В определенных обстоятельствах гидрографическая служба / организация может считать необходимым определять объекты меньших размеров для минимизации риска необнаружения опасности для надводной навигации. Для категории 1а ослабление критерия обнаружения объектов до глубины 40 м отражает максимальные ожидаемые осадки судов.

4. Междугалсовое расстояние может быть увеличено, если использованы процедуры по соблюдению надлежащего обеспечения плотности глубин. Параметр «максимальное междугалсовое расстояние» должен быть интерпретирован в следующем виде: междугалсовое расстояние для съемки с односторонним эхолотом или расстояние между использованными внешними границами полосы обзора систем площадной съемки.

5. Прим. 5 относится только к измерениям, необходимым для съемки.

В 2011 г. текст из приложений S-44 был включен в гл. 2 обновленного Руководства по гидрографии МГО C-13¹.

В сентябре 2020 г. МГО выпустила новую 6-ю редакцию стандартов на гидрографические съемки S-44 (версия 6.0) и в 2022 г. — уточненный вариант (версия 6.1), в который были внесены незначительные уточнения².

В 6-й редакции S-44 (2022 г.) было внесено много новшеств, которые не только уточнили и конкретизировали отдельные положения предыдущих двух редакций, но и ввели ряд существенных изменений, которые можно охарактеризовать в качестве новых парадигм современной электронной гидрографии.

Основные нововведения 6-й редакции S-44 (2022 г.) сводятся к следующему.

1. В отличие от двух предыдущих редакций S-44, положения которых носили рекомендательный характер, в новой 6-й редакции выделены императивные уровни: «должен» (*Must*), означающий обязательное требование; «следует» (*should*) — рекомендуемое действие, а также «может» (*may*) как возможное, но не обязательное действие. Таким образом, частично меняется ранее существовавший рекомендательный характер Стандартов S-44 МГО, приближая их к нормативному документу МГО.

2. Введена новая, более строгая категория съемки, названная «эксклюзивной» (*Exclusive Order*), которая расширяет применимость Стандартов. Данная категория предназначена для критических для навигации районов, таких как порты, гавани и подходные каналы с минимальным запасом воды под килем и в случае, когда характеристики дна наиболее опасны для судов. В таких районах Стандарт устанавливает максимально возможную точность глубин и особые требования обследования дна. Такая категория ранее уже использовалась в национальных стандартах шведской гидрографии.

3. Определено новое понятие «batimетрическое покрытие» (*Bathymetric Coverage*), определяющее степень обследования района с использованием систематического метода измерения глубин. Данная величина основана на сочетании выбранной схемы обследования с теоретически рассчитываемой областью акустического освещения дна (пятна облучения) и обнаружения объектов с помощью применяемого исследовательского оборудования. Величина батиметрического покрытия выражена в процентах.

4. С понятием *batimетрическое покрытие* тесно связана новая концепция 6-й редакции S-44³ (2022 г.), заключающаяся в отказе от назначения величины междугалсового расстояния для категорий 1b и 2 согласно Стандарту S-44 (2008 г.), а также условия, в соответствии с которыми *batimетрическое покрытие* (в %) используется для всех четырех категорий съемки. При этом для категорий 1b и 2 батиметрическое покрытие может быть существенно меньше 100 %, но не менее 5 %. Для категории 1а не требуется обязательного 100 %-го *batimетрического покрытия*, для особой категории и категории 1а может составлять 100 %.

¹ Manual on Hydrography. Publication C-13. 1st Edition. Monaco: International Hydrographic Bureau, 2011. 539 p.

² IHO Standards for Hydrographic Surveys (6.1.0 Edition). S-44. Monaco: International Hydrographic Bureau, 2022. 43 p.

³ Там же.

Особым случаем является *эксклюзивная категория*, для которой предусмотрено батиметрическое покрытие до 200 %. При этом в качестве примера в п. 3.5.2 приведена модель расчета батиметрического покрытия для промера с ОЛЭ, имеющего угол характеристики направленность 8–12°. Полученный результат составил 5,1 %. Подтверждается, что 100 %-е *батиметрическое покрытие* следует понимать как «полное» и не отождествлять с понятием «полное акустическое освещение дна», которое, согласно Стандарту S-44 (2008 г.), для современных средств площадной съемки рельефа не может составлять 100 %.

5. Концепция *батиметрического покрытия* имеет еще один актуальный аспект, связанный с практикой использования съемки по первой категории. Если для заданного района съемка выполняется с использованием средств площадного обследования, а характер рельефа и глубины не требуют обязательного 100 %-го *батиметрического покрытия*, то при съемке по категории *1a* расстояние в плане между зарегистрированными местами измерения глубин не должно превышать величину более трех глубин или быть 25 м в зависимости от того, что больше (см. п. 3.5.2 6-й редакции S-44¹).

6. Понятие *батиметрического покрытия* совмещено с двумя другими актуальными параметрами: обнаружение объектов (*Feature Detection*) и поиска объектов (*Feature Search*). Для категории *1a* может быть предусмотрен 100 %-й поиск объектов с применением гидролокатора бокового обзора, однако при этом независимая батиметрическая система должна обеспечить определение наименьших глубин над существенными объектами, обнаруженными на дне. Рекомендуется выполнять 100 %-й поиск объектов совместно со 100 %-м *батиметрическим покрытием*, где это практически возможно. Эти комплексные требования по проектированию и выполнению съемок для удовлетворения нужд различных участников морской деятельности привели к введению в пп. 6.1 S-44² нового понятия — *матрица спецификаций*.

7. В 6-й редакции Стандарта S-44 семь глав и четыре приложения. В новую редакцию включены главы: «Съемки над высотным уровнем» (*Surveys Above the Vertical Datum*), «Метаданные» (*Metadata*) и «Матрица спецификаций» (*Specification Matrix*).

Глава «Съемки над высотным уровнем» содержит рекомендации по трехмерному позиционированию «небатиметрических» объектов, актуальных для безопасности навигации в соответствии с заданными категориями съемки. При этом, в отличие от предыдущих редакций Стандарта S-44, следует применять заданные неопределенности их планового и высотного положения. Следует отметить, что для береговой линии (*coastline*) нормирование *неопределенности* ее высотного положения (СВН) не применяется. Детальные сведения по позиционированию небатиметрических объектов приведены в табл. 2 Стандартов S-44. В главе «Метаданные» представлен примерный минимальный перечень метаданных, которыми рекомендуется сопровождать результаты съемок. Также гидрографическим службам рекомендуется создавать собственные документы с расширенным перечнем метаданных по результатам съемок.

8. В седьмой главе 6-й редакции Стандартов S-44 вводится концепция *матрицы спецификаций* (*Specification Matrix*). Это новый инструмент для оптимизации и настройки разных категорий съемок. Матрица позволяет выбирать набор критериев как для батиметрических параметров, так и для других типов данных, которые регистрируются и предоставляются в процессе гидрографической съемки. Матрица вводится для обеспечения гибкости в постановке задачи и оценки результатов съемки, учета потребностей различных потребителей и приспособления к вновь появляющимся технологиям. В Приложение D включено руководство по использованию *матрицы спецификаций*. В гл. 7 содержится также табл. 1 «Минимальные батиметрические стандарты на гидрографические съемки в целях безопасности мореплавания», которая в авторском переводе с английского языка включена в данную работу в виде табл. 2. Более подробная информация и комментарии к табл. 1–3 6-й редакции Стандартов S-44 (версия 6.1.0.), включая пояснения по матрице спецификации, приведены в работе [13].

¹ IHO Standards for Hydrographic Surveys (6.1.0 Edition). S-44. Monaco: International Hydrographic Bureau, 2022. 43 p.

² Там же.

Таблица 2

Минимальные батиметрические стандарты на гидрографические съемки в целях безопасности мореплавания (п. 7.3¹)

СВН: (англ. TVU) использована формула $TVU_{max}(d) = \sqrt{a^2 + (b \times d)^2}$,

где a — параметр, который выражает ту часть неопределенности, которая не изменяется в зависимости от глубины;

b — это коэффициент, который выражает ту часть неопределенности, которая изменяется в зависимости от глубины;

d — глубина.

Стандарты МГО ²	Критерии	Категория 2	Категория 1b	Категория 1a	Особая категория	Эксклюзивная категория
Гл. 1	Описание районов (обобщенное)	Районы, в которых общее описание морского дна считается достаточным	Районы, в которых глубина под килем не представляет проблемы для того вида надводного судоходства в данном районе	Районы, в которых глубина под килем не рассматривается как крайне важная, но в которых могут находиться объекты, способные представлять опасность для надводного судоходства	Районы, в которых глубина под килем имеет критически важное значение	Районы с критическими минимальными глубинами под килем и критериями маневренности
П. 2.6	ТНУ глубины, м + % глубины	20 м + 10 % глубины *Ba5, Bb2	5 м + 5 % глубины *Ba8, Bb3	5 м + 5 % глубины *Ba8, Bb3	2 м *Ba9	1 м *Ba10
П. 2.6, п. 3.2, п. 3.2.3	Компоненты a , m , и b , TVU глубины	$a = 1,0$ м $b = 0,023$ *Bc7, Bd4	$a = 0,5$ м $b = 0,013$ *Bc8, Bd6	$a = 0,5$ м $b = 0,013$ *Bc8, Bd6	$a = 0,25$ м $b = 0,0075$ *Bc10, Bd8	$a = 0,15$ м $b = 0,0075$ *Bc12, Bd8
П. 3.3	Обнаружение объектов в м или в % глубины	Не установлено	Не установлено	Кубические объекты > 2м, на глубинах до 40 м; 10 % глубины на глубинах больше 40 м *Bc5, Bf3 — более 40 м	Кубические объекты > 1 м *Be6	Кубические объекты > 0,5 м *Be9
П. 3.4	Поиск объектов, %	Рекомендовано, но не требуется	Рекомендовано, но не требуется	100 % *Bg9	100 % *Bg9	200 % *Bg12
П. 3.5	Батиметрическое покрытие, %	5 % *Bh3	5 % *Bh3	≤ 100 % *≤ Bh9	100 % *Bh9	200 % *Bh12

¹ IHO Standards for Hydrographic Surveys (6.1.0 Edition). S-44. Monaco: International Hydrographic Bureau, 2022. 43 p.

² Там же.

9. В 6-й редакции Стандартов S-44 дан обновленный словарь терминов — глоссарий (Glossary). Особо следует отметить терминологию, касающуюся оценки точности, в соответствии с новыми принципами международной метрологии [16]. Аналогично 5-й редакции для оценки точности планово-высотного положения используется термин «неопределенность» (*uncertainty*). При этом уточняется, что неопределенность является оценкой (*estimate*) истинного значения величины, которая дается на заданном уровне доверительной вероятности. Для *СГН (THU)* и *СВН (TVU)* задан уровень 95 %.

В 5-й редакции Стандартов S-44 не рекомендован к использованию термин «ошибка» (*error*). Однако в 6-й редакции он вновь используется, при этом уточняется, что ошибки могут быть *случайными* и *систематическими*. Также необходимо отметить, что в глоссарии отсутствуют такие термины, как *precision* (точность) и *accuracy* (аккуратность). Последний термин пока еще используется в недавних публикациях МГО¹. Отсутствует также такое актуальное для гидрографии понятие и термин, как «грубая ошибка глубин» (*blunder*).

10. 6-я редакция Стандартов S-44 предполагает *нормальное распределение ошибок*, при котором *неопределенность позиции* рассчитывается как коэффициент 2,45, умноженный на *стандартное отклонение (Standard Deviation)*. При этом в Стандартах S-44 не указывается, на каком уровне доверительной вероятности рассчитано это «стандартное отклонение» (позиции), и отсутствует формула расчета. В зарубежной практике для оценки точности двумерного положения используются разные меры точности с соответствующими уровнями доверительной вероятности. Принятой в Российской Федерации мерой точности оценки местоположения по ГНСС, получаемой на основе параметров предложения \$GPGST [14] протокола NMEA, является *среднеквадратическое радиальное отклонение*, представляющее собой аналог DRMS (*Distance Root Mean Square*). Для измерений в физике и геодезии, а также гидрографии двумерная оценка DRMS тождественна *Standard Deviation*. Мера точности местоположения DRMS имеет доверительную вероятность 63 %. Подробнее этот вопрос рассмотрен в разделе «Обсуждение» данной статьи.

11. 6-я редакция Стандартов S-44 предлагает своеобразную трактовку априорной и апостериорной оценки точности батиметрической съемки. Информация по контролю точности содержится в прил. В «Руководящие указания по управлению качеством», прил. С «Руководство по априорному и апостериорному контролю качества», а также прил. D «Аспекты батиметрии, связанные с регулярными сетками (гридами)». Данные приложения не являются неотъемлемой частью Стандартов S-44 и предполагается, что будут удалены в последующих редакциях, когда содержащаяся в них информация войдет в публикацию C-13 МГО «Руководство по гидрографии»².

12. Расчеты априорной оценки точности батиметрической съемки, известные как *модель неопределенностей*, включены практически во все ЭГИС при настройке системы, необходимые для обработки данных МЛЭ в соответствии с технологией CUBE [15]. Алгоритмы расчета априорной модели неопределенностей изложены в работах [7] и [11].

10. Вопрос об апостериорной оценке точности батиметрической съемки, приведенной в прил. В, предполагает использование специального «тестового» полигона — участка дна с детальной цифровой моделью рельефа, которая будет использоваться для сравнения с *батиметрической моделью-сеткой*, полученной в результате выполненной съемки. При этом использование глубин контрольных галсов для последующего их сравнения с поверхностью *батиметрической модели-сетки* (грида), полученной по результатам обработки данных съемки на основных галсах, в тексте 6-й редакции в прил. В вообще не рассматривается.

11. В прил. D. Gridded Bathymetry Considerations, в авторском переводе «Аспекты батиметрии, связанные с *сеточными моделями* (гридами)», впервые в гидрографии введен термин *grid* (сеточная модель или регулярная сетка) и дана новая трактовка понятия «батиметрическая модель-сетка» (*Gridded Bathymetric Model*).

¹ S-67. Mariners' Guide to Accuracy of Depth Information in Electronic Navigational Charts (ENC). Edition 1.0.0. International Hydrographic Organization, 2020. 22 p.

² Manual on Hydrography. Publication C-13. 1st Edition. Monaco: International Hydrographic Bureau, 2011. 539 p.

12. Установление взаимосвязи высот уровней нулей глубин с топографическими высотными уровнями и высотами геоцентрической системы координат имеет актуальное значение в современной электронной гидрографии. В 5-й редакции S-44 этому вопросу посвящен п. 4.1, в котором было установлено требование, в соответствии с которым высоты нулей глубин должны быть связаны с нулем топографической системы высот, а реперы уровенных постов иметь геодезическую высоту в используемой геоцентрической системе координат ITRS (WGS84). В 6-й редакции Стандартов S-44 эти вопросы кратко и изложены только в п. 2.4 и не связаны с технологией альтернативного варианта определения поправок уровня на основе высокоточного определения геодезической высоты реперов уровенных постов и нулей глубин с помощью ГНСС. Данный вопрос более конкретно рассмотрен в разделе «Обсуждение».

13. В 6-й редакции Стандартов S-44 вновь отмечается, что гидрограф, являясь важным участником процесса съемки, должен обладать достаточными знаниями и опытом, чтобы иметь возможность эксплуатировать съемочную систему в соответствии с требованиями данных стандартов. Впервые об этом было заявлено во введении 5-й редакции Стандартов S-44. В 6-й редакции требования в части подготовки гидрографов получили дальнейшее развитие. В том числе отмечается необходимость получения установленных компетенций и знаний в этой области согласно требованиям образовательных программ категории A и / или B, разработанных Международным советом по стандартам компетентности для гидрографов-геодезистов и морских картографов (IBSC), Международной гидрографической организацией (ИНО), Международной федерацией геодезистов (FIG), а также Международной картографической ассоциацией (ICA).

Обсуждение (Discussion)

Прежде всего следует отметить высокую преемственность основных положений 5-й и 6-й редакций Стандартов S-44 МГО, однако при этом имеются также существенные различия, главными из которых является введение новой «эксклюзивной» категории съемки (*Exclusive Order*), а также таких новых понятий, как «батиметрическое покрытие» (*Bathymetric Coverage*) и «обнаружение объектов» (*Feature Detection*).

В результате введения новых понятий: «батиметрическое покрытие» (*Bathymetric Coverage*) и «обнаружение объектов» (*FEATURE DETECTION*) в 6-й редакции S-44 впервые оказалось возможным отказаться от такого ранее важного для гидрографии параметра, как «подробность промера», или «междугалсовое расстояние» (*Line Spacing*). Понятие «батиметрическое покрытие» в 6-й редакции Стандартов S-44 введено взамен ранее применяемого в пятой редакции S-44 (2008 г.) понятия «полное обследование морского дна» (*Full Sea Floor Search*). При этом не рекомендовалось использовать термины «100 %-е акустическое освещение» (*100 % ensonification*) и «100 %-е батиметрическое покрытие» (*100 % Bathymetric Coverage*). В 6-й редакции термин «батиметрическое покрытие» восстановлен, но смысл его изменился и теперь он означает *степень обследования поверхности дна акватории*, задаваемой в %. Это понятие оказало большое влияние на интерпретацию применения первой категории съемки.

Использование понятия «батиметрическое покрытие» позволило отказаться от жесткой увязки съемки по первой «a» категории с требованием «полного» (приближающегося к 100 %) акустического освещения дна. Теперь для съемки по 1a категория «батиметрическое покрытие» может составлять не более 100 %, а для съемки категории 1b — менее 100 % при условии, что расстояния между отметками глубин на дне не будут составлять более трех глубин, либо 25 м (что больше). При этом для съемок с ОЛЭ «батиметрическое покрытие» не должно составлять менее 5 %. Для съемок *особой категории* предусматривается батиметрическое покрытие 100 %, а для эксклюзивной категории — 100 %-е батиметрическое покрытие, которое может включать две взаимно пересекающиеся системы основных галсов.

Совместное применение таких понятий, как «батиметрическое покрытие», «обнаружение объектов» и «поиск объектов» (*Feature Search*) обусловило возможность также целесообразность использования в 6-й редакции Стандартов S-44 нового инструмента в виде «матрицы спецификаций»

(*Specification Matrix*). Идея применения такого инструмента заключается в поддержке процесса проектирования съемки для задач, отличных от создания морских навигационных карт, и формировании краткой характеристики съемки для представления заказчику. Текст 6-й редакции Стандартов S-44 содержит подраздел «Описание матрицы и правила работы с матрицей спецификаций» с отступлениями от принятой в 5-й редакции Стандартов, включая установку о том, что спецификации должны разрабатываться национальными гидрографическими службами на основе Стандартов S-44. Применение «матрицы спецификаций» не является обязательным требованием 6-й редакции Стандартов, и реальная практика применения в ближайшие годы докажет ее эффективность. Попытки создания универсальных стандартов, пригодных для нормирования съемок в самых разных целях, отличных от съемок для создания морских навигационных карт, являются несостоятельными. Более подробный и детальный анализ применения «матрицы спецификаций» в 6-й редакции Стандартов представлен в работе [13].

В 6-й редакции Стандартов S-44 впервые «узаконено» использование батиметрических моделей, создаваемых на основе регулярных сеток глубин (*Gridded Bathymetric Models*), а в прил. D показана методология их создания и использования, а также приведены основные термины и определения. Учитывая, что указанное приложение не является частью данных стандартов и его планируется позже включить в Руководство по гидрографии МГО, представленные тексты следует существенно доработать, приведя их в соответствие с имеющимся гидрографическим программным обеспечением. При этом в прил. D следует четко разграничить применение цифровых моделей рельефа дна (ЦМР) в реальном масштабе времени, используемое в большинстве ЭГИС для оперативного контроля качества работы многолучевых сонаров и ЦМР, которые создаются на этапе постобработки и окончательной обработки данных многолучевых сонаров для получения конечного продукта съемки.

В режиме реального времени ЦМР используются исключительно на основе регулярных сеток глубин (гридов), а при окончательной обработке используются как гриды, так и нерегулярные сетки. В течение последних двадцати лет такими фирмами, как Quality Positioning Services (QPS), Teledyne CARIS (Computer Aided Resources Information System), EIVA, HYPACK и др., созданы специализированные пакеты гидрографических программ для оперативного и окончательного создания батиметрических моделей. Поэтому Руководство по гидрографии МГО должно включать не только теоретические сведения по батиметрическим моделям в виде регулярных сеток глубин (гридов), но и их практическую реализацию в различных гидрографических информационных системах. В этой связи следует также отметить своеобразные предложения 6-й редакции Стандартов S-44 по формированию апостериорной модели неопределенностей результатов съемки рельефа дна, изложенные в прил. B и актуальные для площадной съемки с использованием многолучевых сонаров. Предлагается апостериорную модель неопределенностей съемки рельефа оценивать на основе сравнения батиметрических моделей выполненной съемки с тестовой батиметрической моделью заранее созданного полигона, на котором была выполнена детальная площадная съемка рельефа. Данный метод, известный как «эксплуатационный тест» (*Performance Test*), используется при выполнении мелководной площадной съемки и рекомендуется в Руководстве по инженерной гидрографии корпуса военных инженеров США (US ACE)¹. Описание эксплуатационного теста приведено также в [11]. Этот метод является полезным и необходимым инструментом, который, как правило, применяется для проверки качества функционирования системы с МЛЭ и проводится перед началом съемок, а также при замене оборудования.

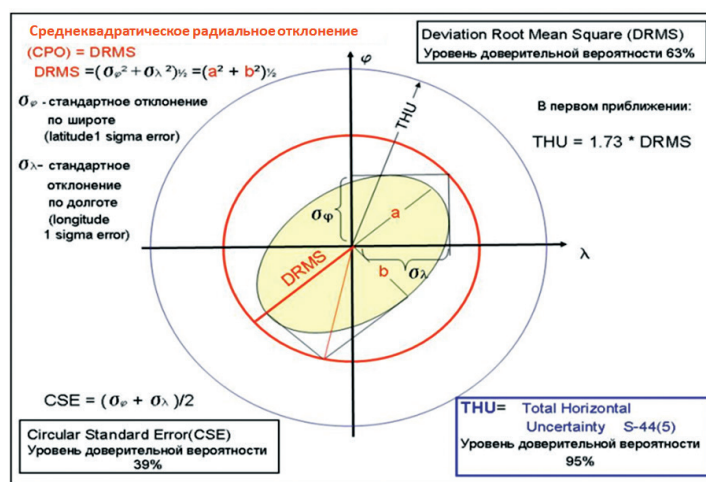
В ЭГИС HYPACK имеется специальный программный модуль для автоматизации проведения эксплуатационного теста и установления гидрографической ширины полосы обзора мелководного МЛЭ [11]. Однако он не может заменить традиционный для гидрографии метод получения апостериорной модели неопределенностей съемки рельефа, каким является *статистическая обработка результатов сравнения глубин основных и контрольных галсов*. Такая статистическая обработка авто-

¹ Engineering and Design. Hydrographic Surveying. EM 1110-2-1003. Washington: U.S. Army Corps of Engineers, 2013. 700 p.

матризована в большинстве ЭГИС (например, NYPACK, CARIS HIPS, Qimera) и отражена в качестве нормы в большинстве национальных гидрографических стандартов, спецификациях и руководствах по использованию многолучевых эхолотов для морских исследований [17]–[20], а также отечественном нормативном документе «Правила гидрографической службы» № 4, ч. 2 применительно к промеру с ОЛЭ. Отсутствие в 6-й редакции Стандартов S-44 упоминания о необходимости выполнения контрольных галсов является очевидным упущением, которое необходимо исправить в последующих редакциях.

В трех последних редакциях Стандартов S-44 при оценке планового положения используется термин «стандартное отклонение» (*Standard Deviation*) без конкретного указания доверительной вероятности. На практике обычно используется «стандартное отклонение позиции», называемое *среднеквадратическим радиальным отклонением* (CPO), являющееся аналогом зарубежной меры точности Distance Root Mean Square (DRMS), имеющее доверительную вероятность в пределах 63–68 %. Расчет точного значения доверительной вероятности позиции, оцениваемой стандартным отклонением, основан на соотношении полуосей среднеквадратического эллипса погрешностей a и b . Эти величины для конкретной спутниковой обсервации содержатся в строке NMEA — xxGST.

Для пересчета оценки точности позиции от стандартного отклонения к неопределенности позиции с 95 %-й доверительной вероятностью может быть использован коэффициент k , рассчитываемый на основе соотношения b/a . При $b/a = 1$ $k = 1,73$, а при $b/a = 0,1$ $k = 1,95$. Этот вопрос подробно исследован в табл. 4.14 (см. Мореходные таблицы (MT-2000). Адм. № 9011. — СПб.: ГУНиО, 2002. — 576 с.), а также в работах [10] и [16], в которых рассмотрена оценка точности спутниковой обсервации по ГНСС, а также дано обоснование для расчета суммарной горизонтальной неопределенности (THU) на основе использования значения CPO при $b/a = 1$. На приведенной схеме показаны различные меры точности для расчета планового положения с их доверительными вероятностями, используемые в зарубежной практике.



Расчет точности планового положения
с 95 %-м уровнем доверительной вероятности на основе CPO [10]

Отметим, что только при использовании меры точности в виде Circular Standard Error (CSE): круговой стандартной ошибки с уровнем доверительной вероятности 39 %, может быть использована формула

$$THU = 2,45 \cdot CSE = 2,45 (\sigma_x + \sigma_y) / 2. \quad (1)$$

Кроме того, CSE не может рассматриваться в качестве стандартного отклонения при оценке позиции, поскольку имеет доверительную вероятность, равную 39 %. В российской практике вместо CSE используется CPO — аналог зарубежной оценки DRMS. При этом формула для расчета неопределенности позиции в виде THU для частного случая $b/a = 1$ примет вид

$$THU = 1,73DRMS = 1,73 \cdot (\sigma^2x + \sigma^2y)^{1/2}. \quad (2)$$

Использование формулы (2) рекомендовано при расчете THU для общего случая, когда $b/a < 1$ неудобна и лучше применять формулу (1). Расчет величины априорной суммарной горизонтальной неопределенности глубин на дне, базирующийся на основе данных МЛЭ, основанный на алгоритмах работы [7] с использованием меры точности позиции, в соответствии с формулой (1), автоматизирован в программе AMUST (Apriori Multi-beam Uncertainty Simulation Tool)¹.

Таким образом, приведенная в п. 2.7 6-й редакции Стандартов S-44 рекомендация по применению коэффициента $k = 2,45$ для расчета величины суммарной горизонтальной неопределенности на основе использования величины стандартного отклонения² требует дополнительного пояснения и уточнения. Целесообразно указать в глоссарии, что *имеется в виду стандартное отклонение позиции, рассчитываемое на основе осреднения стандартных отклонений по широте и долготе* или привести формулу (1). Следует отметить, что в Гидрографическом словаре МГО³ термин *Standard Deviation* применительно к оценке позиции отсутствует, а при обсуждении терминов, связанных с оценкой точности, нигде не упоминается их доверительная вероятность и не приводятся формулы, использующие в качестве аргументов величины σ_x и σ_y .

Кроме того, в 6-й редакции стандартов S-44 следует также отметить недостаточную проработку вопросов, связанных с альтернативным способом определения поправок уровня на основе высокоточного определения высот нулей глубин в геоцентрической системе координат. В 5-й редакции Стандартов S-44 этот вопрос рассмотрен в п. 4.1, в котором установлено требование о том, чтобы высоты нулей глубин были связаны с нулем топографической системы высот, а реперы уровневных постов имели геодезическую высоту в используемой геоцентрической системе координат ITRS (WGS84).

В Стандартах S-44 (2022 г.) вопрос определения поправок уровня рассмотрен только в п. 2.4 Vertical Reference Frame, который в авторском переводе сформулирован следующим образом: «Если высотный компонент местоположения привязан к местному высотному датуму, следует указывать название и эпоху этого датума (системы отсчета). Высотный компонент местоположения (например, глубин, высот осушки) следует привязывать к такой системе отсчета высот, которая подходит для конкретного типа данных и их предполагаемого использования. Эта система отсчета высот может основываться на наблюдениях за приливами (это может быть LAT, MWL и т. д.) на физической модели (например, геоид) или на референц-эллипсоиде».

Данный пункт не содержит конкретных указаний по альтернативному определению поправок уровня. Следует рекомендовать определение на уровневных постах разности высот поверхностей нуля глубин и моделей геоида. Получение этого параметра является основой альтернативного метода вычисления поправок уровня, реализованного в большинстве современных ЭГИС. Достигнуты дециметровые точности получения высоты геоида на основе региональных и глобальных моделей. Возможная точность определения геодезических высот реперов уровневных постов на основе фазовой двухчастотной многосистемной аппаратуры ГНСС с использованием технологий PPP (*Precise Point Positioning*) также составляет 0,1–0,2 м. Таким образом, в настоящее время появляются новые технологические возможности альтернативного определения поправок уровня, свидетельствующие о начале эры трехмерной (3D) гидрографии.

Следует констатировать отсутствие новых российских спецификаций выполнения гидрографических съемок, основанных на Стандартах S-44 МГО, и необходимость их разработки, согласования и утверждения. Главным недостатком использования устаревших правил выполнения гидрографической съемки, в соответствии с ПГС-4⁴, является точность глубин и координат, осно-

¹ Work instruction V3.0.0 for AMUST. Version 3.0.0. Rijkswaterstaat, 2018. 61 p.

² IHO Standards for Hydrographic Surveys (6.1.0 Edition). S-44. Monaco: International Hydrographic Bureau, 2022. 43 p.

³ Hydrographic Dictionary [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://iho-ohi.net/S32/> (дата обращения: 10.07.2023).

⁴ Правила гидрографической службы №4. Съемка рельефа дна. Ч. 2: Требования и методы. Изд. Министерства Обороны СССР. Главное управление навигации и океанографии, 1984. 264 с.

ванная на 63 %-й доверительной вероятности, а Стандарты S-44 МГО¹ предписывают представление результатов съемки с 95 %-й доверительной вероятностью. Таким образом, требования к точности в Стандартах S-44 в два раза выше заданных в ПГС-4. В новом документе следует принять концепцию категорий съемки, создание модели погрешностей, принципы контроля качества площадной съемки и формирования метаданных. Работы по подготовке нового документа ПГС-4 уже проводились 10 лет назад, однако результирующий итоговый документ не был утвержден в качестве нормативного.

Разработку новых национальных стандартов следует считать приоритетной задачей российской гидрографии, а до их введения в части точности предоставляемых результатов съемки целесообразно руководствоваться требованиями и нормами Стандартов S-44 МГО (2022 г.). Отсутствие нового ПГС-4 не позволяет дать правильную оценку гидрографических работ, выполненных на трассах СМП, которые в перспективе планируются для международного использования. Высокоширотные маршрутные коридоры в море Лаптевых и Восточно-Сибирском море целесообразно выполнять в соответствии с требованиями категории *Ia* Стандартов S-44 МГО. Эти вопросы рассмотрены в работе [21]. Следует отметить, что первая попытка создания национальных стандартов на выполнение гидрографических работ реализована в 2023 г. в виде ГОСТа 70750–2023², анализ и оценка которого выходят за рамки данной статьи.

Выводы (Summary)

В результате выполненного анализа 5-й и 6-й редакции S-44 можно сделать следующие выводы:

1. 5-я и 6-я редакции Стандартов S-44 МГО имеют большую преемственность основных положений, однако выявлены и существенные различия, главными из которых является введение новой *исключительной* категории съемки (*Exclusive Order*), а также новых понятий, таких как «батиметрическое покрытие» (*Bathymetric Coverage*) и «обнаружение объектов» (*Feature Detection*).

2. В результате введения новых понятий: «батиметрическое покрытие» (*Bathymetric Coverage*) и «обнаружение объектов» (*Feature Detection*) в 6-й редакции Стандартов S-44 впервые появилась возможность отказаться от такого важного гидрографического параметра, как «междугалсовое расстояние» (*Line Spacing*).

3. Использование понятия «батиметрическое покрытие», задаваемого в %, позволяет отказаться от строгой увязки съемки по первой категории *a* с требованием «полного» (приближающегося к 100 %) акустического освещения дна. Теперь для съемки по категории *Ia* батиметрическое покрытие может составлять не более 100 %, а для съемки категории *Ib* — менее 100 % при условии, что расстояния между отметками глубин на дне не будут более трех глубин либо 25 м (в зависимости от того, что больше). При этом для съемок с ОЛЭ батиметрическое покрытие не должно составлять менее 5 %.

4. Совместное применение понятий: «батиметрическое покрытие», «обнаружение объектов» и «поиск объектов» (*Feature Search*), привело к необходимости использования в 6-й редакции Стандартов S-44 такого нового инструмента для проектирования съемки и формирования краткой характеристики съемки, как «матрица спецификаций» (*Specification Matrix*). Текст 6-й редакции S-44 стандартов содержит подраздел описания матрицы и правила работы с матрицей спецификаций, нарушая принятую в 5-й редакции установку о том, что спецификации должны разрабатываться национальными гидрографическими службами на основе Стандартов S-44.

5. В трех последних редакциях Стандартов S-44 для оценки планового положения используется термин «стандартное отклонение» без указания доверительной вероятности и формулы расчета этой величины на основе известных значений стандартных отклонений по широте

¹ IHO Standards for Hydrographic Surveys (6.1.0 Edition). S-44. Monaco: International Hydrographic Bureau, 2022. 43 p.

² ГОСТ Р 70750–2023. Гидроэлектростанции. Гидротехнические сооружения. Подводно-техническое обследование состояния гидротехнических сооружений и примыкающих к ним участков неукрепленного русла. Нормы и требования. М.: Российский институт стандартизации, 2023. 62 с.

и долготе. На практике для оценки планового положения в качестве *стандартного отклонения позиции* повсеместно используется мера точности в виде СРО (DRMS), что приводит к неоднозначности рекомендации применения коэффициента $k = 2,45$ для расчета величины суммарной горизонтальной неопределенности.

6. В 6-й редакции Стандартов S-44 в прил. D впервые узаконено использование батиметрических моделей, создаваемых на основе регулярных сеток глубин (*Gridded Bathymetric Models*), а в приложении D показана методология их создания и использования, а также основные термины и определения. Учитывая, что прил. D не является частью стандартов и его планируется в дальнейшем включить в Руководство по гидрографии МГО, представленные тексты следует существенно доработать, приведя их в соответствие с имеющимся гидрографическим программным обеспечением.

7. Следует отметить недостаточную проработку в 6-й редакции Стандартов S-44 вопросов, связанных с альтернативным способом определения поправок уровня на основе высокоточного определения геодезической высот реперов уровенных постов и нулей глубин с использованием прецизионных ГНСС-обсерваций в геоцентрической системе координат, также известных в специальной зарубежной гидрографической литературе, как RTK-tide.

8. Для апостериорной оценки качества результатов батиметрической съемки предлагается использовать тестовый полигон, а результаты постобработки с применением статистического анализа на основе сравнения глубин основных и контрольных галсов, применительно к заданной категории съемки, в 6-й редакции S-44 вообще не упоминаются. Этот очевидный недостаток стандартов необходимо исправить при подготовке очередной редакции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wells D. E. IHO S44 Standards for Hydrographic Surveys and the Variety of Requirements for Bathymetric Data / D. E Wells, D. Monahan // Lighthouse: Journal of the Canadian Hydrographic Association. — 2001. — No. 60. — Pp. 31–39.
2. Monahan D. Variable errors and fixed boundaries: the role of deep echo-sounding in the United Nations Convention on Law of the Sea (UNCLOS) / D. Monahan // Lighthouse: Journal of the Canadian Hydrographic Association. — 2001. — No. 59. — Pp. 17–23.
3. MacPhee S. B. S-44 And Multibeam Echosounding / S. B. MacPhee, R. Hare // Lighthouse: Journal of the Canadian Hydrographic Association. — 2003. — No.64. — Pp. 11–16.
4. Фирсов Ю. Г. Стандарты современной гидрографии и российские нормативные документы на выполнение гидрографических работ / Ю. Г. Фирсов // Навигационно-гидрографическое обеспечение условий плавания судов в акваториях морских и речных портов, на трассах Севморпути, по внутренним водным путям: материалы всероссийского семинара (Санкт-Петербург, 12–14 апреля 2005 г.) / ГМА им. адм. С. О. Макарова. — СПб.: ГМА им. адм. С. О. Макарова, 2005. — С. 28–34.
5. Фирсов Ю. Г. К вопросу о нормативных документах для выполнения гидрографических работ / Ю. Г. Фирсов // Навигация и гидрография. — 2006. — № 23. — С. 97–107.
6. Фирсов Ю. Г. Анализ нормативных документов отечественной инженерной гидрографии / Ю. Г. Фирсов, И. В. Меньшиков // Геодезия и картография. — 2012. — № 4. — С. 46–50.
7. Hare R. Depth and Position Error Budget for Multibeam Echosoundings / R. Hare // International Hydrographic Review. — 1995. — Vol. LXXII. — No. 2. — Pp. 37–69.
8. Фирсов Ю. Г. Пятая редакции международного Стандарта на гидрографические съемки S-44 Международной Гидрографической Организации / Ю. Г. Фирсов // Эксплуатация морского транспорта. — 2008. — № 1 (51). — С. 39–44.
9. Alkan R. M. Evaluation of Recent Hydrographic Survey Standards / R. M. Alkan, N. O. Aykut // Proc. of the 19th International Symposium on Modern Technologies, Education and Professional Practice in Geodesy and Related Fields. — Bulgaria, Sofia, 2009. — Pp. 116–130.
10. Фирсов Ю. Г. Обоснование требований к оценке точности площадной съемки в соответствии с пятой редакцией Стандарта S-44 МГО / Ю. Г. Фирсов // Эксплуатация морского транспорта. — 2008. — № 2 (52). — С. 42–46.
11. Фирсов Ю. Г. Основы гидроакустики и использование гидрографических сонаров: учеб. пособие. / Ю. Г. Фирсов. — СПб.: Нестор-История, 2010. — 348 с.

12. Фирсов Ю. Г. Гидрографическое обеспечение морских изысканий: учеб. пособие / Ю. Г. Фирсов. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2017. — 235 с.
13. Зубченко Э. С. Новая редакция Стандарта S-44 Международной гидрографической организации / Э. С. Зубченко // Записки по гидрографии. — 2021. — № 312. — С. 38–64.
14. Фирсов Ю. Г. Контроль качества трехмерного позиционирования в электронной гидрографии / Ю. Г. Фирсов // Эксплуатация морского транспорта. — 2009. — № 3 (57). — С. 34–39.
15. Calder B. R. Automatic Statistical Processing of Multibeam Echosounder Data / B. R. Calder // International Hydrographic Review. — 2003. — Vol. 4. — No. 1. — Pp. 53–68.
16. Гарматенко И. С. Международные стандарты оценки точности навигационной информации / И. С. Гарматенко // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. — 2013. — Т. 6. — № 8. — С. 863–866.
17. Hydrographic Survey Specifications and Deliverables. — Office of Coast Survey, National Oceanic and Atmospheric Administration, 2021. — 154 p.
18. Standards for hydrographic surveys. — Edition 4. — Canadian Hydrographic Service, 2021. — 15 p.
19. Guidelines for the use of multibeam echosounders for offshore surveys. — Rev.2. — IMCA S003, July 2015. — 54 p.
20. HYSPEC—Contract Specifications for Hydrographic Surveys. — Version 2.0. — New Zealand: New Zealand Hydrographic Authority, 2020. — 64 p.
21. Фирсов Ю. Г. Задачи батиметрической съемки и картографического обеспечения высокоширотных трасс Северного морского пути в Восточно-Сибирском море / Ю. Г. Фирсов, Д. А. Позенкова // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 5. — С. 744–766. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-5-744-766.

REFERENCES

1. Wells, David E., and David Monahan. “IHO S44 Standards for Hydrographic Surveys and the Variety of Requirements for Bathymetric Data.” *Lighthouse: Journal of the Canadian Hydrographic Association* 60 (2001): 31–39.
2. Monahan, David. “Variable errors and fixed boundaries: the role of deep echo-sounding in the United Nations Convention on Law of the Sea (UNCLOS).” *Lighthouse: Journal of the Canadian Hydrographic Association* 59 (2001): 17–23.
3. MacPhee, Stephen B., and Rob Hare. “S-44 And Multibeam Echosounding.” *Lighthouse: Journal of the Canadian Hydrographic Association* 64 (2003): 11–16.
4. Firsov, Yu. G. “Standarty sovremennoi gidrografii i rossiiskie normativnye dokumenty na vypolnenie gidrograficheskikh rabot.” *Navigatsionno-gidrograficheskoe obespechenie uslovii plavaniya sudov v akvatoriakh morskikh i rechnykh portov, na trassakh Sevmorputi, po vnutrennim vodnym putyam: materialy vserossiiskogo seminara*. SPb.: GMA im. adm. S. O. Makarova, 2005. 28–34.
5. Firsov, Yu. G. “K voprosu o normativnykh dokumentakh dlya vypolneniya gidrograficheskikh rabot.” *Navigation and Hydrography* 23 (2006): 97–107.
6. Firsov, Yu. G., and I. V. Menshikov. “Specification documents analysis of the domestic engineering hydrography.” *Geodesy and Cartography* 4 (2012): 46–50.
7. Hare, Rob. “Depth and Position Error Budget for Multibeam Echosoundings.” *International Hydrographic Review* LXXII.2 (1995): 37–69.
8. Firsov, Yu. G. “5th edition of the international standard for hydrographic mapping S-44 of the International Hydrographic Organization (based on the materials from foreign sources).” *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 1 (2008): 39–44.
9. Alkan, Reha Metin, and N. Onur Aykut. “Evaluation of Recent Hydrographic Survey Standards.” *Proc. of the 19th International Symposium on Modern Technologies, Education and Professional Practice in Geodesy and Related Fields*. Bulgaria, Sofia, 2009. 116–130.
10. Firsov, Yu. G. “Justification of the requirements to the evaluation of the accuracy of the areal mapping in accordance with the 5th edition of the S-44 standard of the International Hydrographic Organization.” *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 2(52) (2008): 42–46.
11. Firsov, Yu. G. *Osnovy gidroakustiki i ispol'zovanie gidrograficheskikh sonarov*. SPb.: Nestor-Istoriya, 2010.
12. Firsov, Yu. G. *Gidrograficheskoe obespechenie morskikh izyskanii*. SPb.: Izd-vo GUMRF im. adm. S. O. Makarova, 2017.

13. Zubchenko, Eduard S. “Novaya redaktsiya Standarta S-44 Mezhdunarodnoi gidrograficheskoi organizatsii.” *Zapiski po gidrografii* 312 (2021): 38–64.
14. Firsov, Yu. G. “Kontrol’ kachestva trekhmernogo pozitsionirovaniya v elektronnoi gidrografii.” *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 3(57) (2009): 34–39.
15. Calder, Brian R. “Automatic Statistical Processing of Multibeam Echosounder Data.” *International Hydrographic Review* 4.1 (2003): 53–68.
16. Garmatenko, I. S. “International standards of the assessment of accuracy of navigation information.” *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies* 6.8 (2013): 863–866.
17. *Hydrographic Survey Specifications and Deliverables*. Office of Coast Survey, National Oceanic and Atmospheric Administration, 2021.
18. *Standards for hydrographic surveys*. Edition 4. Canadian Hydrographic Service, 2021.
19. *Guidelines for the use of multibeam echosounders for offshore surveys*. Rev.2. IMCA S003, July 2015.
20. *HYSPEC—Contract Specifications for Hydrographic Surveys*. Version 2.0. New Zealand: New Zealand Hydrographic Authority, 2020.
21. Firsov, Yury G., and Daria A. Pozenkova. “The tasks for bathymetric investigations and cartographic support of the northern sea high latitude routes in the East Siberian Sea.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 15.5 (2023): 744–766. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-5-744-766.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Фирсов Юрий Георгиевич —
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация,
Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
e-mail: gidrograph@mail.ru, kaf_gm@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Firsov, Yury G. —
PhD, associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: gidrograph@mail.ru, kaf_gm@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 3 декабря 2023 г.
Received: December 3, 2023.