

УДК 550.38435:551.71

Н.В. Лубнина<sup>1</sup>, А.Ю. Бычков<sup>2</sup>

## МАГНИТОТАКТИЧЕСКИЕ БАКТЕРИИ И БИОМАГНЕТИЗМ: КРИТЕРИИ ОТБОРА ОБРАЗЦОВ ДЛЯ НАЦИОНАЛЬНОГО БАНКА-ДЕПОЗИТАРИЯ ЖИВЫХ СИСТЕМ<sup>3</sup>

Магнитотактические бактерии, продуцирующие в ходе своей жизнедеятельности наноразмерные кристаллы магнетита или грейгита (либо оба минерала) внутри клеток, играют важную роль в биогеохимических процессах, например в круговороте железа и серы, а также в процессах приобретения осадочными породами естественной остаточной намагниченности. Несмотря на десятилетия исследований, знания об их распространении и экологии по-прежнему ограничены. Приведены принципы выбора образцов для национального банка-депозитария живых систем на основе петро-палеомагнитных методов исследования продуктов биоминерализации.

**Ключевые слова:** биомagnetизм, магнитотактические бактерии, депозитарий живых систем.

Magnetotactic bacteria produce nanosized crystals of magnetite or greigite (or both minerals) inside the cell and play an important role in biogeochemical processes, for example for iron and sulfur, as well as magnetization of sedimentary rocks forming. Despite decades of research, knowledge about their distribution and ecology are still limited. The principles of samples selection for national biobank-depository of the living systems is described using petro- and paleomagnetic methods.

**Key words:** biomagnetism, magnetotactic bacteria, biobank-depository of the living systems.

**Введение.** Магнитотактические бактерии в последнее время находят все большее применение в различных областях науки, в том числе в геоэкологии, минералогии и биомagnetизме, кристаллографии, биохимии и биомедицине, физике и даже астробиологии. Открытие в 1975 г. выпускником Массачусетского университета Р. Блейкмором магнитотактических бактерий послужило толчком к развитию нового направления в науке — биомagnetизма [Blakemore, 1975]. Исследования показали, что несколько видов бактерий, выделенных из болотного ила, перемещались преимущественно на север по магнитному меридиану и в сторону поверхностных слоев воды [там же]. Источник магнетизма этих бактерий — чистый магнетит ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), который они синтезируют из железа в ходе своей жизнедеятельности [Evans, Heller, 2003].

Различают два способа образования магнетита бактериями — ВІМ (*biologically induced mineralization*) и ВОМ (*biologically organized mineralization*). При образовании ВІМ-магнетита его состав, кристаллографическая форма, размер и пространственная организация магнитных зерен не контролируются жизнедеятельностью бактерий. Магнитотактические бактерии этой группы (например, *Geobacter metallireducens*) в ходе жизнедея-

тельности используют аморфный гидроксид железа ( $\text{Fe}^{3+}$ ) и производят восстановленное железо  $\text{Fe}^{2+}$ , которое откладывается в окружающую среду в виде магнетита [Evans, Heller, 2003]. Магнитные зерна, продуцируемые такими бактериями, обычно плохо раскристаллизованы, имеют неправильную форму и широкий диапазон размеров магнитных зерен [там же].

В процессе ВОМ-минерализации образование магнитных минералов происходит внутри клеток магнитотактических бактерий. При этом состав, кристаллографическая форма, размер и пространственная организация магнитных зерен контролируются жизнедеятельностью бактерии (наиболее изученная из них *Aquaspirillum magnetotacticum*). Продуцированные таким образом кристаллы магнетита, как правило, выстроены в цепочки, в которых каждый кристалл занимает свой цитоплазматический отсек — магнитосом. Магнитосомы представляют собой выпячивания цитоплазматической мембраны, окружающие частички железа. Актиноподобный белок *Magnetospirillum magneticum* отвечает за «правильное» расположение магнитосом, если его нет, магнитосомы расположены беспорядочно по поверхности клетки [Shih, Rothfield, 2006].

<sup>1</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра динамической геологии, профессор, докт. геол.-минерал. н.; e-mail: natalia.lubnina@gmail.com

<sup>2</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геохимии, профессор, докт. геол.-минерал. наук; e-mail: andrewbychkov@rambler.ru

<sup>3</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 14-50-00029).

В зависимости от условий обитания магнитотактических бактерий разработана классификация по форме кристаллов магнитных минералов [Bazylinski, Williams, 2007]: пресноводные виды *Magnetospirillum* продуцируют кубооктаэдрические кристаллы; *D. magneticus*, сульфат-редуцирующие магнитотактические бактерии, синтезируют удлинённые кристаллы магнетита; в морских условиях магнитотактические бактерии образуют вытянутые кубооктаэдрические магнитосомы. Магнитотактические кокки синтезируют псевдогексагональные вытянутые призматические кристаллы, а магнитотактические вибрионы — вытянутые кубооктаэдрические.

Вместе с тем термин «магнитотактические бактерии» не имеет таксономического смысла. Как показано в работе [Bazylinski, Frankel, 2004], магнитотактические бактерии следует рассматривать как многообразную совокупность прокариот, которых объединяет общая черта — способность к биоминерализации магнитосом. Несмотря на различия, магнитотактические бактерии имеют ряд общих черт — это грамотрицательные прокариоты, филогенетически связанные с доменом бактерий. Они передвигаются при помощи жгутиков, являются микроаэрофилами или анаэробами; имеют респираторные формы метаболизма (за одним исключением); проявляют активность и, следовательно, способны фиксировать атмосферный молекулярный азот; они мезофильны относительно повышения температуры и обладают магнитосомами [там же]. Тем не менее физиология и метаболизм магнитотактических бактерий сильно отличаются и зависят, в том числе, от условий культивирования, что во многих случаях отражается на их магнитных характеристиках [Bazylinski, Williams, 2007].

Предполагается, что механизм магнитотаксиса служит для перемещения в область оптимальных условий на границе донный осадок—вода, но эта гипотеза не объясняет все особенности магнитотактических бактерий. В частности, этот механизм эффективен только в высоких широтах, а магнитное поле вблизи экватора не позволяет бактериям различить «верх» и «низ».

**Изучение магнитотактических бактерий при решении геологических задач.** Бактерии — производители магнитных минералов широко распространены практически на всех континентах. Вместе с тем магнитотактические бактерии существуют в водной среде преимущественно в условиях наличия достаточно резкой окислительно-восстановительной границы (ОВГ) и именно вблизи этой границы [Kopp, Kirshvink, 2008]. При этом концентрация бактерий вблизи этой границы может достигать 100 клеток/мл [Bazylinski, Sch bbe, 2007].

Осадки современных озер — великолепные палеогеографические архивы, и в них, как правило, с хорошим разрешением записаны изменения

климата, геомагнитного поля, других событий и в целом эволюция окружающей среды за последние тысячелетия [Evans, Heller, 2003]. Огромную роль в этом играют широко распространенные в осадках и осадочных породах биогенные магнитные минералы.

**ВОМ-магнетизм.** Магнитотактические бактерии, продуцирующие магнитосомы, детально описаны при петро-палеомагнитных исследованиях современных озерных отложений [Нурғалиев и др., 2009; Snowball et al., 1999; Peck, King, 1996; Peng et al., 2000]. Полученные данные использованы для оценки времени приобретения породами характеристических компонент намагниченности и корреляции полученных данных с глобальными циклами, в том числе с циклами Миланковича [Evans, Heller, 2003]. Кроме того, изучение биомангнетизма позволяет определять как изменения климата (потепление—похолодание), так и изменения геоэкологической ситуации в исследуемом осадочном бассейне (различные загрязнения).

Вместе с тем ориентировка/переориентировка магнитосом по направлению современного геомагнитного поля и сохранение этого направления происходят только в процессе жизнедеятельности магнитотактических бактерий. После смерти ВОМ-бактерии она становится «магнитным» осадком, упорядочение магнитных минералов разрушается в процессе образования ориентационной (детритовой) остаточной намагниченности. Данные, полученные при изучении уже литифицированных голоценовых осадков озер, свидетельствуют о занижении наклона, что свойственно осадочным породам на постдиагенетической стадии. Также установлено, что резкое уменьшение величины естественной остаточной намагниченности и изменение направления вектора естественной остаточной намагниченности (NRM) в мелководных морских карбонатах происходят в процессе диагенеза и доломитизации [Evans, Heller, 2003].

**Решение палеоэкологических/палеогеографических задач на основании ВОМ-магнетизма.** Поскольку каждый вид магнитотактических бактерий ВОМ-типа очень резко реагирует на окислительно-восстановительные условия и содержание серы в воде, их широко используют при построении палеогеографических реконструкций, причем не только современных. Изучение магнитных минералов, продуцированных магнитотактическими бактериями, в кембрийских известняках Сибири позволило восстановить обстановки осадконакопления в это время [Changetal, 1987].

**ВИМ-магнетизм.** Главное направление изучения этого вида магнетизма связано с изучением палеопочв. Поскольку после того как ВИМ-бактерия продуцирует из себя железо, она погибает, а дальнейшие реакции, приводящие к образованию новых магнитных минералов, происходят в таком случае уже без участия магнитотактических

бактерий, запечатленные в минералах-носителях намагниченности величина и направление геомагнитного поля не претерпевают значительных изменений после формирования осадка/палеопочвы. В этом случае важную роль играет еще один вид петро-палеомагнитных исследований — изучение анизотропии магнитной восприимчивости (AMS), что позволяет восстановить направление и закономерности источников сноса минералов — носителей намагниченности.

Современные исследования показывают, что в осадках часто присутствуют как ВМ-, так и ВОМ-минералы, которые надежно различаются по петромагнитным параметрам (коэрцитивным спектрам, петлям гистерезиса, магнитной восприимчивости и др.). Данные корректного разделения суммарной естественной остаточной намагниченности, фиксируемой в породах, на основании понимания природы ВМ- или ВОМ-магнетизма позволяют реконструировать палеогеографические события более обоснованно.

*Петро-палеомагнитные исследования магнитотактических бактерий в современных озерах.* Использование петро-палеомагнитных методов позволяет исследовать распределение биогенных магнитных минералов в разрезах почв и донных отложений, понять эволюцию осадочного бассейна. Вместе с тем выделение магнитотактических бактерий из природных сред облегчается их движением в магнитном поле. Для этого донный осадок и придонную воду отбирают в емкость, где может происходить культивация бактерий в течение длительного времени. Для получения фракции, обогащенной магнитотактическими бактериями, с внешней стороны на уровне границы вода–осадок устанавливается постоянный магнит. Через 1–3 ч. у северного полюса магнита с внутренней стороны стенки емкости формируется видимое невооруженным глазом пятно, представляющее собой концентрированную фракцию магнитотактических бактерий [Горленко и др., 2011]. Выделение монокультур возможно с использованием магнитного фракционирования. Такие исследования проводились для ряда пресноводных бассейнов России, в результате были выделены сообщества оз. Селигер и р. Пшада.

Микробиологические методы исследования донных отложений трудоемки и продолжительны. Для определения присутствия в донных осадках магнитотактических сообществ и их характеристик может быть использован комплекс петро-палеомагнитных методов.

Петро-палеомагнитная информативность озерных отложений в большей степени определяется седиментационными процессами, в ходе которых накапливаются железосодержащие минералы. Разнообразные типы озер формируют индивидуальный состав магнитных минералов. Основной вид диагностики состава ферромагнитной фракции

осадков — термомагнитный анализ (ТМА) или его модификация — зависимость магнитной восприимчивости от температуры. Оба метода основаны на изучении зависимости индуктивной намагниченности от температуры (ТМА) в первом случае или магнитной восприимчивости от температуры при скорости нагрева 50–150 °С/мин. Высокая скорость нагрева используется для уменьшения влияния окисления и образования вторичных (лабораторных) магнитных минералов.

Большую роль при исследованиях озерных отложений играют измерения магнитной восприимчивости, которая зависит от скорости осадконакопления в озере, типа осадка, изменения климата и др. Непрерывное измерение поведения магнитной восприимчивости с глубиной позволяет определять соотношение вноса ферромагнитной, парамагнитной, диамагнитной и суперпарамагнитной фракции в объемную магнитную восприимчивость. Парамагнетики чаще всего характеризуют привнос в бассейн терригенного материала; ферромагнетики, как правило, имеют биогенное происхождение, а суперпарамагнетики могут иметь как биогенное, так и терригенное происхождение. Один из основных факторов, определяющих осадконакопление в озерах, — климатические условия. Значительные вариации величины магнитной восприимчивости по разрезу свидетельствуют о существенных изменениях в режиме озера. При этом величина магнитной восприимчивости в основном варьирует за счет изменений количества привнесенного терригенного материала. Иногда вариации магнитной восприимчивости могут быть связаны с изменением ферромагнитной составляющей, связанной с растворением зерен магнетита биогенного происхождения [Нургалиев и др., 2009]. Уменьшение величины магнитной восприимчивости с глубиной часто связано с окислительными процессами. В процессе жизнедеятельности магнитотактических бактерий размеры продуцируемых магнитных частиц варьируют в диапазоне 35–120 нм [Diaz-Ricci, 1992]. После смерти магнитотактических бактерий сохранность магнитных минералов зависит от окружающей среды. Показано, что крупные кристаллы магнетита сохраняются в течение длительного времени, а мелкие претерпевают значительное окисление и разрушаются. В связи с этим верхняя часть разреза характеризуется более высокими значениями магнитной восприимчивости [Нургалиев и др., 2009].

В последнее время при петро-палеомагнитных исследованиях используются коэрцитивные спектры нормального остаточного намагничивания для выявления остатков магнитотактических бактерий в осадках нескольких современных озер, полученные с помощью коэрцитивного спектрометра [Нургалиев и др., 2009]. Для разложения коэрцитивных спектров на составляющие используется техника вэйвлет-анализа по естественному базису,

что позволяет выявлять в осадках современных озер магнитные ансамбли разного происхождения [Нургалиев и др., 2010]. Точные значения положения максимума коэрцитивного спектра не являются диагностическим признаком наличия остатков магнитотактических бактерий в осадках. Но если в образцах отложений современных озер одновременно наблюдаются две группы компонент с положением максимума коэрцитивных спектров в диапазонах ~45–85 мТ и ~25–55 мТ, то можно говорить о наличии в образцах остатков магнитосом [Нургалиев и др., 2010].

На сегодняшний день магнитные характеристики остатков магнитосом в осадках и продуктов жизнедеятельности ВМ-бактерий изучены слабо. Проведение детального изучения магнитных характеристик осадков совместно с изучением видового состава микробных сообществ позволит создать базу данных, которая существенно

расширит область применения палеомагнитных методов для проведения палеоклиматических реконструкций и даст возможность для восстановления эволюции магнитотактических сообществ в истории Земли.

**Заключение.** Исследование продуктов биоминерализации комплексом петро-палеомагнитных методов позволяет классифицировать образцы до проведения секвестрования образцов для определения отличий бактериальных сообществ. Такой подход позволит создать базу данных о биогенных магнитных минералах, подкрепленную филогенетическим анализом магнитотактических бактерий. Эта база данных существенно расширит возможности использования биомagnetизма при решении геологических задач, а также позволит исследовать эволюцию бактериальных сообществ во времени, что составляет важнейшую задачу создания банка-депозитария живых систем.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Горленко В.М., Дзюба М.В., Малеева А.Н., Пантелеева А.Н., Колганова Т.В., Кузнецов Б.Б. *Magnetospirillum berrantissp. nov.* — новая пресноводная бактерия с магнитными включениями // Микробиология. 2011. Т. 80, № 5. С. 679–690.

Нургалиев Д.К., Утемов Э.В., Ясонов П.Г. и др. Остатки магнитотактических бактерий в отложениях современных озер — новый инструмент палеогеофизики // Уч. зап. КазГУ. Сер. естественные науки. 2009. Т. 151, кн. 4. 251 с.

Нургалиев Д.К., Утемов Э.В., Ясонов П.Г. Диагностика биогенного магнетита в осадочных породах // Палеомagnetизм и magnetизм горных пород (теория, практика, эксперимент): Мат-лы междунар. школы-семинара «Проблемы палеомagnetизма и magnetизма горных пород». М.; Борок, 2010. С. 147–152.

Bazylinski D.A., Frankel R.B. Magnetosome formation in prokaryotes // Nat. Rev. Microbiol. 2004. Vol. 2. P. 217–230.

Bazylinski D.A., Schübbe S. Controlled biomineralization by and applications of magnetotactic bacteria // Adv. Appl. Microbiol. 2007. Vol. 62(7). P. 21–62.

Bazylinski D.A., Williams T.J. Ecophysiology of magnetotactic bacteria // Magnetoreception and Magnetosomes in Bacteria. Vol. 3. Berlin; Heidelberg: Springer, 2003. P. 37–75.

Blakemore R.P. Magnetotactic bacteria // Science. 1975. Vol. 190 (4212). P. 377–379.

Chang S.-B.R., Stolz J.F., Kirschvink J.L. Biogenic magnetite as a primary remanence carrier in limestone deposits // Phys. Earth and Planet. Int. 1987. Vol. 46. P. 289–303.

Diaz-Ricci J.C., Kirschvink J.L. Magnetic domain state and coercivity predictions for biogenic greigite (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>): A comparison of theory with magnetosome observations // J. Geophys. Res. 1992. Vol. 97. P. 17309–17315.

Evans M.E., Heller F. Environmental magnetism: Principles and applications of enviromagnetism. San Diego: Academ. Press, 2003. 296 p.

Kopp R.E., Kirschvink J.L. The identification and biogeochemical interpretation of fossil magnetotactic bacteria // Earth Sci. Rev. 2008. Vol. 86. P. 42–61.

Peck J.A., King J.W. Magnetofossils in the sediment of Lake Baikal, Siberia // Earth and Planet. Sci. Lett. 1996. Vol. 140. P. 159–172.

Peng X., Jia R., Li R. et al. Paleo-environmental study on the growth of magnetotactic bacteria and precipitation of magnetosomes in Chinese loess-paleosol sequences // Chinese Sci. Bull. 2000. Vol. 45. P. 21–25.

Shih Y.-L., Rothfield L. The Bacterial Cytoskeleton // Microbiology and Molecular Biology Rev. 2006. Vol. 70 (3). P. 729–754.

Snowball I., Sandgren P., Petterson G. The mineral magnetic properties of an annually laminated Holocene Lake-sediment sequence in Northern Sweden // Holocene. 1999. Vol. 9. P. 353–362.

Поступила в редакцию  
29.03.2015

УДК 551.4.03, 551.42, 551.435.3

Н.И. Косевич<sup>1</sup>

## ГЕОЛОГО-ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКАЯ ТИПИЗАЦИЯ ОСТРОВОВ КАНДАЛАКШСКОГО ЗАЛИВА БЕЛОГО МОРЯ

На основании детального геолого-геоморфологического изучения островов Северного, Лувеньгского, Кузакоцкого и Керетского архипелагов Кандалакшского залива Белого моря построены новые оригинальные геолого-геоморфологические карты каждого из изученных островов и общие карты для каждого архипелага. Разработана геолого-геоморфологическая генетическая типизация островной суши, применена графическая визуализация этой типизации. Предпринята попытка применить разработанную типизацию к другим островам акватории Белого моря.

**Ключевые слова:** рельеф, острова, архипелаг, Кандалакшский залив, геолого-геоморфологическая генетическая типизация.

On the base of detailed geological and geomorphological researches of the Northern, Luven'gskogo, Kuzakockogo and Keretskogo archipelagos Kandalaksha Bay of the White Sea new original geological and geomorphological maps of each of the Islands and total maps for each of the archipelago have been done. Geological and geomorphological genetic typing of the island areas has been developed and applied. The result of this typing are visualized and demonstrated in the article. An attempt to use this typing in researching to other islands of the White Sea water is made.

**Key words:** island, archipelago, Kandalaksha Gulf, geological and geomorphological genetic typing.

**Введение.** Белое море характеризуется значительно отличающимися с геолого-геоморфологической точки зрения побережьями и островными территориями, что вызывает интерес у широкого круга геологов и геоморфологов (рис. 1). По мнению многих исследователей [Лымарев, 2002; Булочникова и др., 2010], острова, представляющие результат взаимодействия эндогенных и экзогенных природных процессов, могут служить моделью для изучения закономерностей совместного действия этих процессов и их влияния на факторы рельефообразования. Изучение островной суши — одно из важнейших направлений в морской (островной) геоморфологии. Однако изучению островной суши Белого моря уделялось мало внимания, до настоящего времени отсутствует геолого-геоморфологическая типизация его островов. Для получения детальной информации о строении островов Белого моря, в частности островов Кандалакшского залива, были выполнены комплексные геолого-геоморфологические исследования в крупном и детальном масштабах.

**Тектоническая позиция и геологическое строение района исследований.** Белое море отличается сложной геологической историей и большим разнообразием природных процессов. В тектоническом плане Беломорская впадина находится в области сочленения Балтийского щита и Русской плиты. Кандалакшский залив, расположенный в западной части Белого моря (рис. 1), приурочен к

мезоархейскому—палеопротерозойскому Беломорскому подвижному поясу. Основная структурная единица исследуемого района, определяющая особенности его тектонического развития и строения от рифея до настоящего времени, — Онежско-Кандалакшская [Балуев и др., 2009а] система рифейских грабенов (или Кандалакшско-Двинская [Авенариус, 2004]).

После карельского тектоно-магматического цикла весь регион существовал как единая платформенная структура. В олигоцене область Белого моря вступила в неотектонический этап развития [Балуев, 2006; Слабунов, 2009]. Изостатическое поднятие, охватившее после таяния ледника всю территорию Балтийского щита, во многом определяет современное тектоническое развитие исследуемого района.

В геологическом строении Кандалакшского залива выделяются два структурных этажа. Первый этаж представлен кристаллическим фундаментом, сложенным породами беломорского комплекса архейского возраста. Этот древний комплекс здесь состоит преимущественно из биотитовых, гранат-биотитовых, амфибол-биотитовых гнейсов, амфиболитов, гранитогнейсов, глиноземистых сланцев, кварцитов и прорывающих их многочисленных интрузивных тел разного состава и возраста. Общая мощность этих отложений 8–10 км. Второй структурный этаж представляет собой чехол платформы и начинается с красноцветных

<sup>1</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедры геоморфологии и палеогеографии, инженер; e-mail: nkosevich@googlemail.com

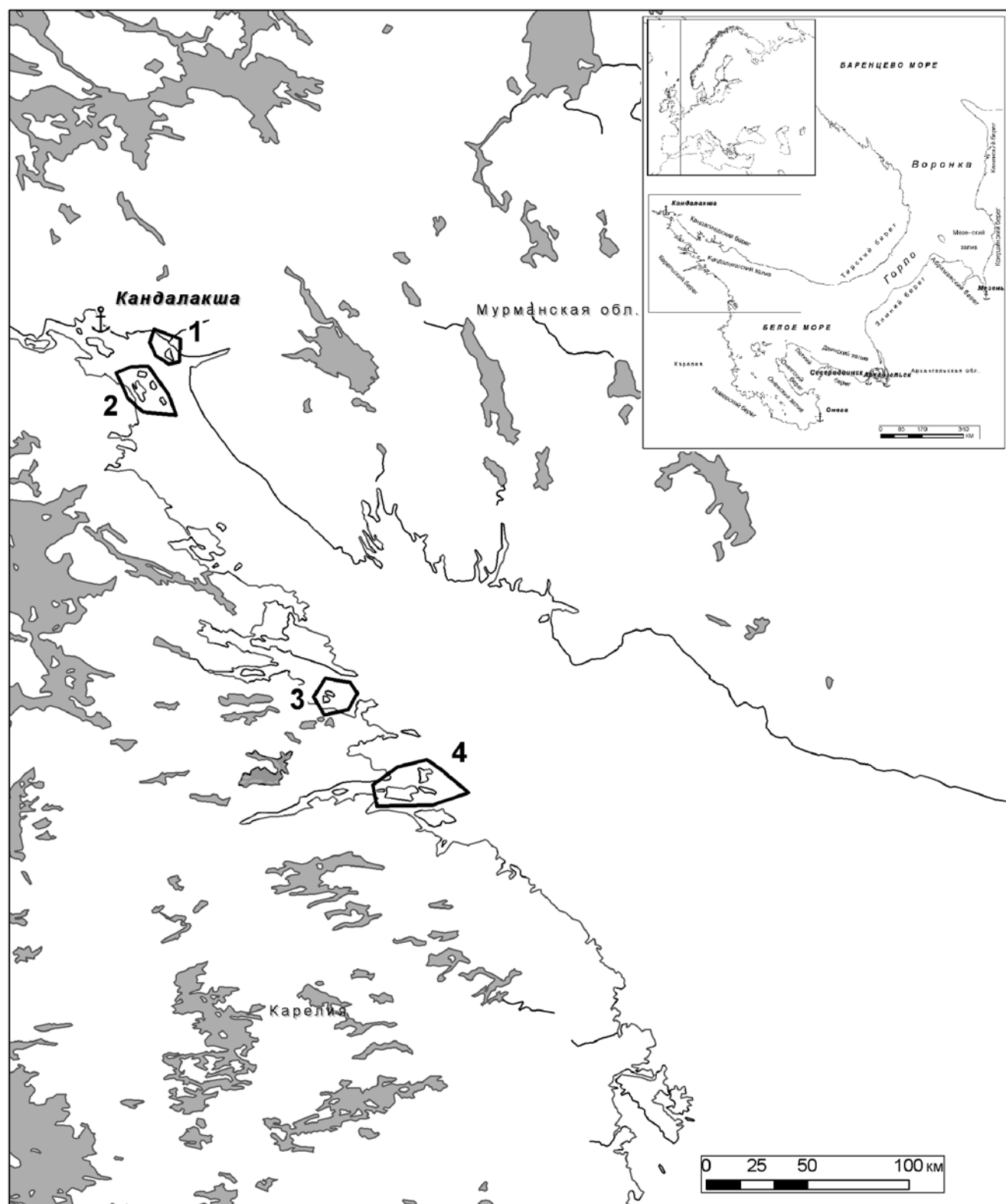


Рис. 1. Схема расположения района исследования и участков исследования: 1 — арх. Лувеньгский; 2 — арх. Северный; 3 — арх. Кузаковский, 4 — арх. Керетский

рифейских песчаников, выполняющих авлокогены кристаллического фундамента, которые в юго-восточном направлении перекрыты терригенными отложениями вендского возраста. На этих древних породах на дне Кандалакшского залива залегает почти сплошной чехол из молодых плейстоценовых и голоценовых отложений.

Современное Белое море — молодой бассейн, образовавшийся в самом конце плейстоцена, его возраст составляет 10–12 тыс. лет (ка). Во время последнего валдайского оледенения вся котловина Беломорского бассейна была заполнена льдом. В аллереде по периферии котловины возникали отдельные пресноводные бассейны. В конце ал-

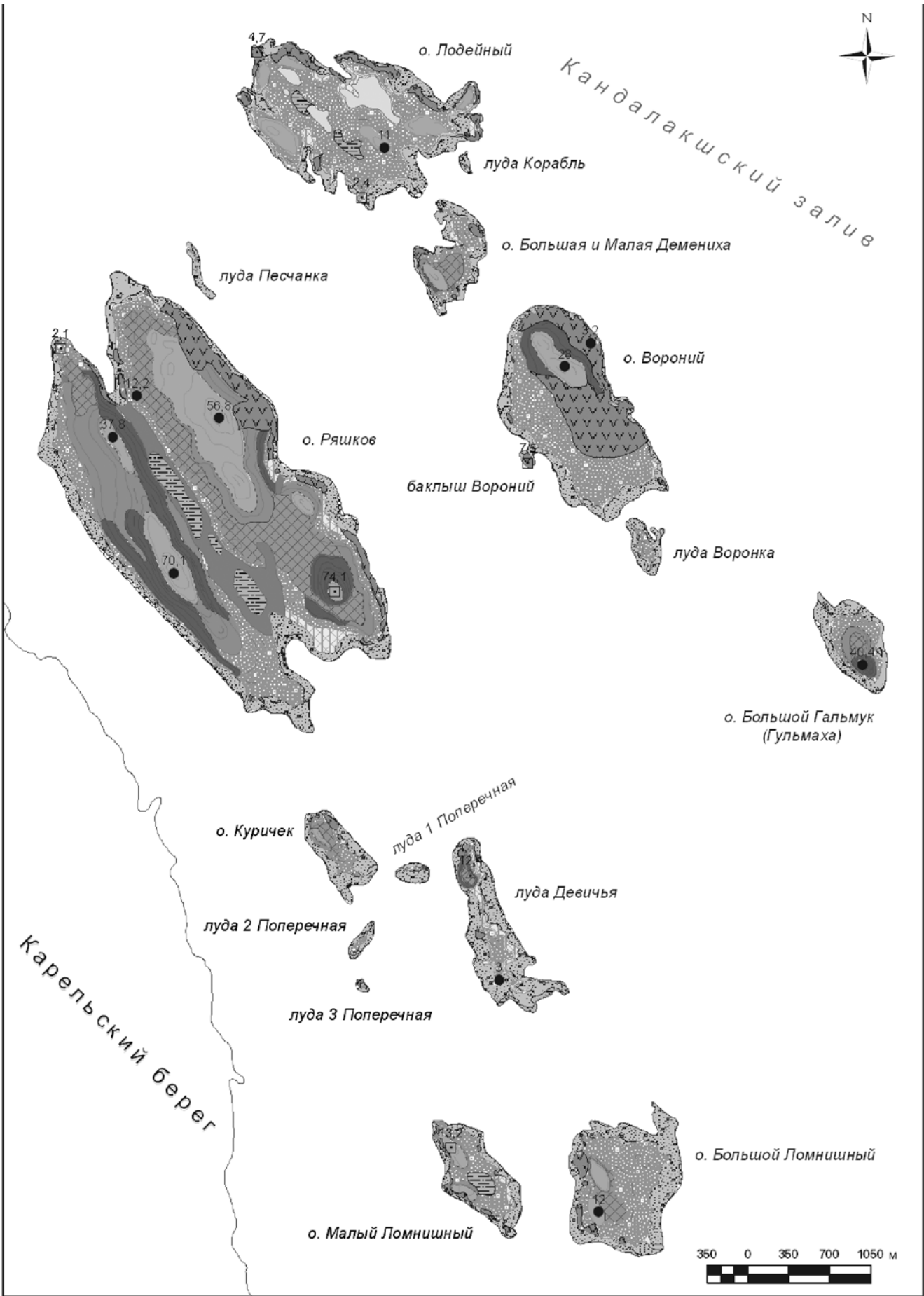


Рис. 2. Геолого-геоморфологическая карта арх. Северный

лереда началось разрушение ледового покрова, в море проникли океанские воды из Баренцева моря, установился режим подледного осадконакопления. Процесс седиментации шел в условиях сложных, часто контрастных тектонических движений, собственных Беломорскому региону.

Дегляциация Беломорского бассейна, начавшаяся в пребореальное время и закончившаяся в начале атлантического времени, привела к образованию разнородной в литологическом, генетическом и возрастном отношении осадочной толщи. Изостатическое поднятие, охватившее после таяния ледника всю территорию Балтийского щита, в описываемом районе составляет около 100 м. После окончательного схода льдов на Белом море установился морской режим седиментации, для которого большое значение приобретают гидродинамический и биологический факторы [Невесский и др., 1977; Рыбалко, 2009; Polaykova et al., 2010]. Таким образом, изменчивые палеогеографические и палеотектонические условия привели к формированию островов с разными геолого-геоморфологическими характеристиками.

**Материалы и методы исследований.** Фактическую основу работы составили материалы, полученные автором в ходе пятилетних экспедиций кафедры геоморфологии и палеогеографии географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова (2007–2013) на отдельных участках Кандалакшского и Карельского берегов Белого моря, а также литературные и фондовые данные. В качестве опорных участков выбраны архипелаги, расположенные в трех частях залива, которые отличаются разнообразными геоморфологическими условиями.

*Первый участок* в кутовой части Кандалакшского залива включает острова Северного и Лувеньгского архипелагов. Острова Лувеньгского архипелага лежат вдоль Кандалакшского берега Белого моря, а острова Северного архипелага — вдоль Карельского берега. Архипелаги, протягивающиеся вдоль Карельского берега Кандалакшского залива, представляют собой несколько параллельных гряд. Острова внутри Лувеньгского архипелага образуют единую полосу, повторяя контуры береговой линии материковой суши. *Второй участок* включает острова Кузакоцкого архипелага, расположенные рядом с Беломорской биологической станцией имени Н.А. Перцова МГУ имени М.В. Ломоносова (ББС МГУ). *Третий участок* представлен островами Керетского архипелага в мористой части губы Чупа.

Сбор детальной информации о геологии и геоморфологии островов заключался в изучении и описании современных экзогенных процессов на ключевых участках, а также в картографировании

их рельефа. На островах выполнены маршруты по профилям с севера на юг и с запада на восток, а также по береговой зоне от мористой границы осушки до тылового шва осушки/пляжа. На профилях отображен характер поверхности и состав отложений. В комплекс геоморфологических маршрутных наблюдений входила фиксация с помощью GPS не только плановых координат точек наблюдения, но и всех наблюдавшихся по маршруту перегибов рельефа (бровки, тыловые швы и т.п.), геоморфологических объектов, точечных и линейных проявлений современных экзогенных процессов, которые нельзя отразить в масштабе карты (тектонические трещины, блоки отседания, искори<sup>1</sup>, эрозионные борозды и т.д.).

Кроме того, для повышения точности привязки фиксировалось пространственное положение опорных линий точек: береговой линии, троп, дорог, просек, урезов озер, построек. В каждой точке описания фиксировались GPS-данные, делали фото местности. Все это позволило выявить и зафиксировать разновысотные уровни рельефа и распределение в их пределах проявлений современных экзогенных процессов в зависимости от уклонов и генезиса поверхности, литологии выходящих на поверхность пород и ландшафтных условий. После проведения маршрута составляли атрибутивные таблицы, в которые заносили координаты точек наблюдения, основные характеристики рельефа (угол наклона, экспозиция склонов, абсолютная высота), субстрата, ландшафтов и проявлений экзогенных процессов как в точках наблюдения, так и по маршруту.

Всего во время полевых исследований на островах Кандалакшского залива Белого моря выполнено 90 маршрутов, в ходе которых описаны 29 островов Лувеньгского архипелага, 16 островов Северного архипелага, 11 островов Кузакоцкого архипелага и 4 острова Керетского архипелага (всего 60 островов).

Анализ и обработка полевых материалов, картографических данных и дешифрирование данных дистанционного зондирования выполнены на базе программного обеспечения ArcGIS 10.1.

**Результаты исследований и их обсуждение.** В результате комплексных исследований (полевые данные и дешифрирование) построены геоморфологические карты изученных в ходе полевых исследований архипелагов (рис. 2), легенда к которым составлена по морфогенетическому принципу, с отображением морфологии и генезиса рельефа исследованных островов (рис. 3).

В результате исследований [Косевич, 2012, 2013] установлены генетически разнообразные формы рельефа, созданные совокупным действием следующих процессов: 1) ледниково-тектонических

<sup>1</sup> Искорь — форма рельефа фитогенного и/или фитогенно-ветровального происхождения [Болысов, 2006]. Состоит из бугра, который сложен рыхлыми отложениями, образованными вывороченными корнями деревьев при их падении, а также западины (ямы) возле него.

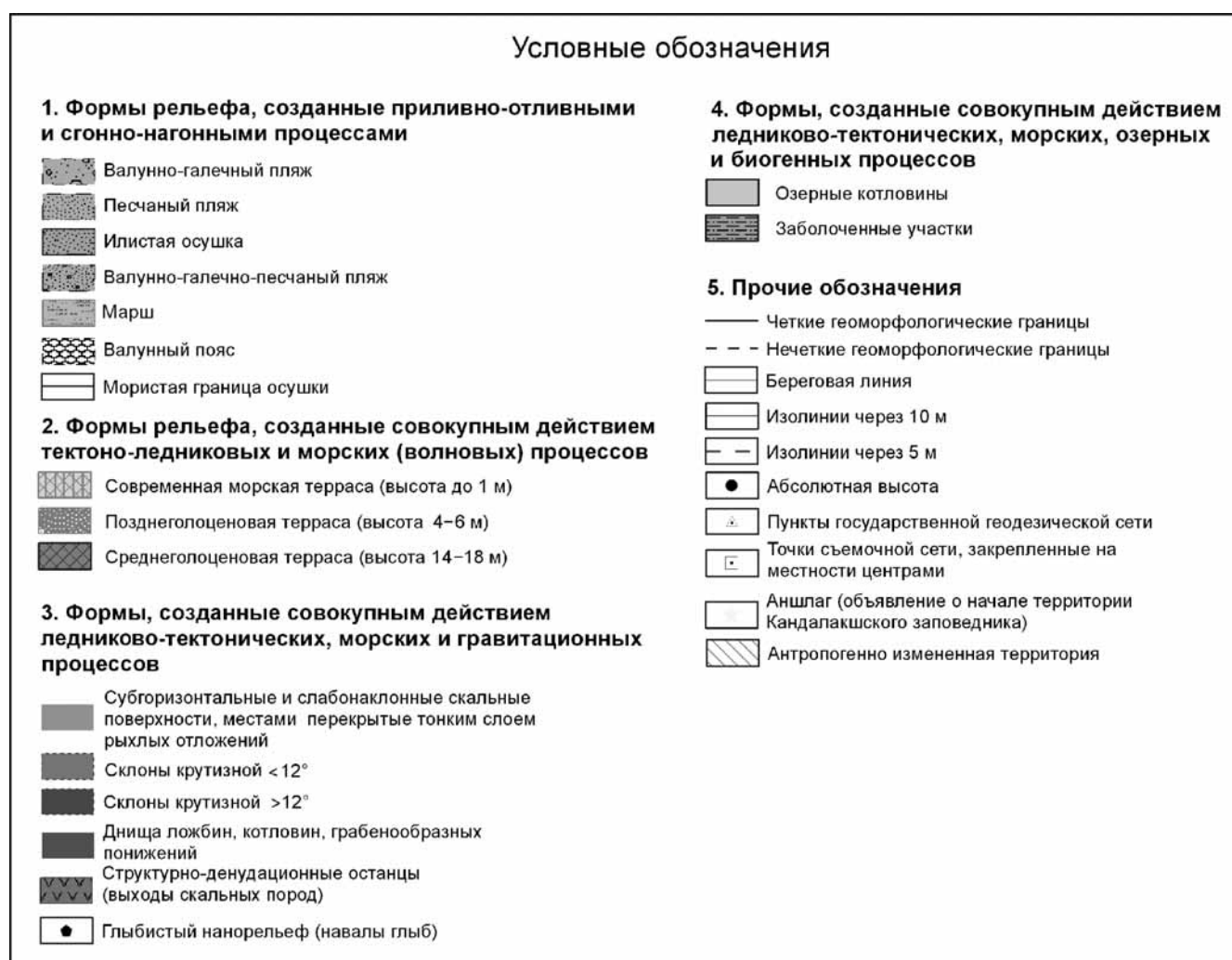


Рис. 3. Условные обозначения к геолого-геоморфологической карте

и морских волновых; 2) приливно-отливных и сгонно-нагонных; 3) ледниково-тектонических, морских и гравитационных; 4) ледниково-тектонических, морских, озерных и биогенных.

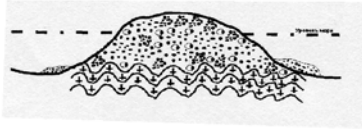
В строении рельефа островов прослеживаются следующие закономерности. Во-первых, вдоль Кандакшского берега залива в строении островов Лувеньгского архипелага в большей степени участвуют формы, сложенные рыхлым материалом с небольшими участками структурно-денудационных останцов. Во-вторых, для островов, протягивающихся вдоль Карельского берега залива, характерно сочетание форм, сложенных рыхлым материалом и коренными скальными отложениями; при этом формы структурно-денудационного генезиса преобладают над формами морского и биогенного генезиса. Таким образом, рельеф островной суши представляет собой сочетание сглаженных округловершинных скальных поверхностей (массивов) с субгоризонтальными участками (фрагментами) морского происхождения, выполненными чехлом рыхлых отложений.

Комплексный анализ распределения форм рельефа, морфометрических характеристик островов и данных о геолого-тектонической истории

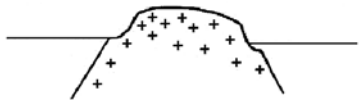
развития региона [Косевич, Романовская, 2014] позволил провести геолого-геоморфологическую типизацию изученных островов (рис. 4). По морфометрическим показателям исследованные острова подразделяются на три группы: малые ( $\leq 1$  га), средние (1–100 га) и крупные ( $\geq 100$  га). Среди малых островов выделены три генетических типа: морские аккумулятивные, тектоно-ледниково-аккумулятивные с морской переработкой и тектоно-ледниково-денудационные с морской переработкой. Острова среднего размера генетически подразделяются на тектоно-ледниково-аккумулятивные с морской переработкой и тектоно-ледниково-аккумулятивно-денудационные с морской переработкой. А острова крупного размера представлены одним генетическим типом — тектоно-ледниково-аккумулятивно-денудационные с морской переработкой.

Типизация островов показала, что для Лувеньгского архипелага (30 островов) характерно следующее распределение (%) генетических типов островов: 34 — малые морские аккумулятивные острова; 20 — малые тектоно-ледниково-аккумулятивные острова с морской переработкой, 33 — средние тектоно-ледниково-денудационные с морской

а

| Малые острова, площадь до 1 га                          |                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|---------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Морские аккумулятивные                                  |  | <p><i>Лувеньгский архипелаг:</i><br/>луды Натальина, Анисимовская, Баржа, Влада, Высочка, Красотка, Краюшка, Морянка, Травяная, Травяная Литоральная.</p> <p><i>Северный архипелаг:</i><br/>луда Песчанка.</p> <p><i>Кузакоцкий архипелаг:</i><br/>не представлены.</p> <p><i>Керетский архипелаг:</i><br/>не представлены.</p> |
| Тектоно-ледниково-аккумулятивные с морской переработкой |  | <p><i>Лувеньгский архипелаг:</i><br/>о-ва Долгая Корга, Короткая Корга, Высокий, Утенок Восточный, Западный и Северный.</p> <p><i>Северный архипелаг:</i><br/>луда Поперечная-1, Поперечная-2.</p> <p><i>Кузакоцкий архипелаг:</i><br/>не представлены.</p> <p><i>Керетский архипелаг:</i><br/>не представлены.</p>             |

б

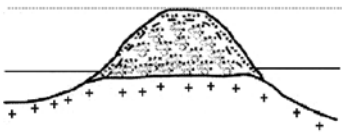
| Малые острова, площадь до 100 га                       |                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                          |
|--------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Тектоно-ледниково-денудационные с морской переработкой |  | <p><i>Лувеньгский архипелаг:</i><br/>не представлены.</p> <p><i>Северный архипелаг:</i><br/>луда/баклыш Корабль, луда Поперечная-3.</p> <p><i>Кузакоцкий архипелаг:</i><br/>не представлены.</p> <p><i>Керетский архипелаг:</i><br/>не представлены.</p> |

переработкой, 13 — средние тектоно-ледниково-аккумулятивно-денудационные с морской переработкой. Острова архипелага Северный (16 островов) распределены следующим образом: 6,25 — малые морские аккумулятивные острова; 12,5 — малые тектоно-ледниково-аккумулятивные с морской переработкой; 12,5 — малые тектоно-ледниково-денудационные с морской переработкой; 6,25 — средние тектоно-ледниково-аккумулятивные с морской переработкой; 56,25 — средние тектоно-ледниково-аккумулятивно-денудационные с морской переработкой и 6,25 — крупные тектоно-ледниково-аккумулятивно-денудационные с морской переработкой. Из 11 изученных островов Кузакоцкого архипелага 72,7% относится

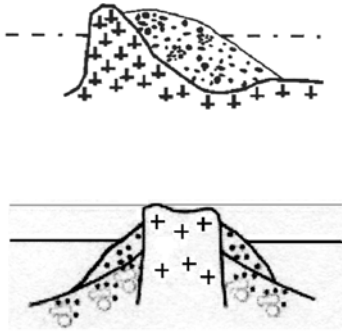
к средним тектоно-ледниково-аккумулятивно-денудационным с морской переработкой и 27,3% — к крупным тектоно-ледниково-аккумулятивно-денудационным с морской переработкой. Из обследованных островов Керетского архипелага 75% — крупные тектоно-ледниково-аккумулятивно-денудационные с морской переработкой, а 25% — средние тектоно-ледниково-аккумулятивно-денудационные с морской переработкой.

**Заключение.** В результате анализа пространственного распределения генетических типов островов в акватории Кандалакшского залива установлено, что в вершинной части залива наблюдаются все генетические типы островов, а по мере приближения к его устью отчетливо устанавлива-

*в*

| Средние острова, площадь до 100 га                      |                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|---------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Тектоно-ледниково-аккумулятивные с морской переработкой |  | <p><i>Лувеньгский архипелаг:</i><br/>о-ва Кожаниха, Малый и Большой Блинец, Редкий, Анисимовский Бережной, Анисимовский Голомянный, Семеновец, Каменный, Горелый, Круглый Власов.</p> <p><i>Северный архипелаг:</i><br/>луда Воронка.</p> <p><i>Кузакоцкий архипелаг:</i><br/>не представлены.</p> <p><i>Керетский архипелаг:</i><br/>не представлены</p> |

*г*

| Средние острова, площадь до 100 га                                   |                                                                                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|----------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Тектоно-ледниково-аккумулятивно-денудационные с морской переработкой |  | <p><i>Лувеньгский архипелаг:</i><br/>о-ва Голомянный Власов, Бережной Власов, Большой Куртяжный, Малый Куртяжный.</p> <p><i>Северный архипелаг:</i><br/>о-ва Вороний, Лодейный, Большой и Малый Ломнишные, Большая и Малая Демениха, Гульмаха, Куричек; луда Девичья.</p> <p><i>Кузакоцкий архипелаг:</i><br/>о. Кокоиха, о-ва Белые, Лушков, Покормежный, Медвежий, Кожамейкин, Еловый.</p> <p><i>Керетский архипелаг:</i><br/>о. Черемшиха</p> |

*д*

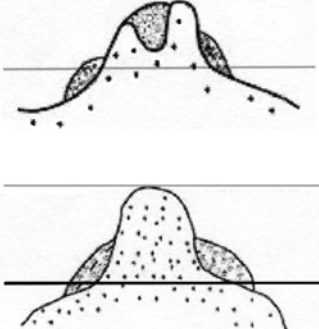
| Крупные острова, площадь свыше 100 га                                |                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                        |
|----------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Тектоно-ледниково-аккумулятивно-денудационные с морской переработкой |  | <p><i>Лувеньгский архипелаг:</i><br/>не представлены.</p> <p><i>Северный архипелаг:</i><br/>о. Ряшков.</p> <p><i>Кузакоцкий архипелаг:</i><br/>о-ва Лушов, Березовый, Костян.</p> <p><i>Керетский архипелаг:</i><br/>о-ва Средний, Сидоров, Кереть</p> |

Рис. 4. Типы островов (а–д) Кандалакшского залива (Белое море)

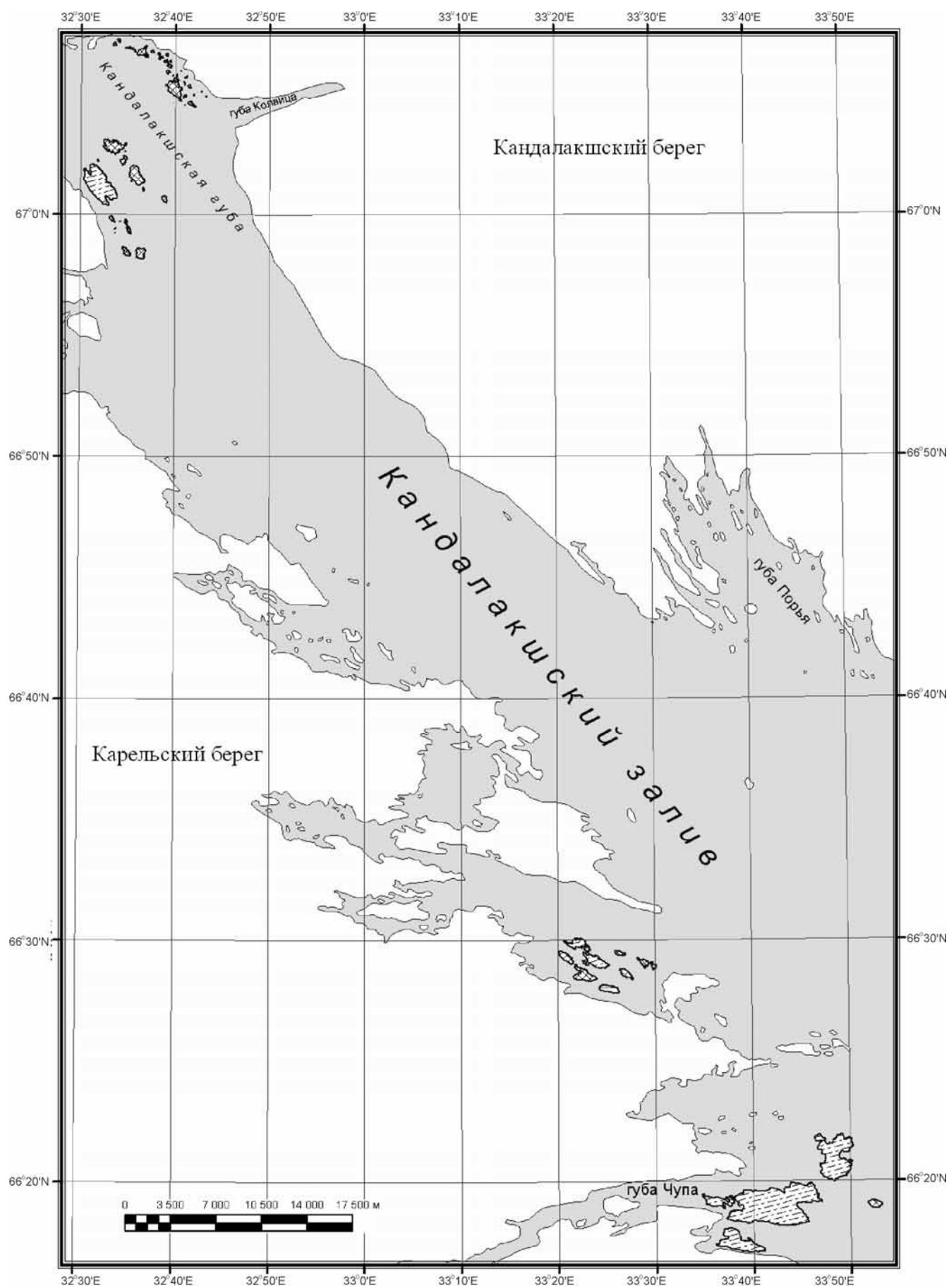


Рис. 5. Геолого-геоморфологические типы островной суши в пределах Кандалакшского залива

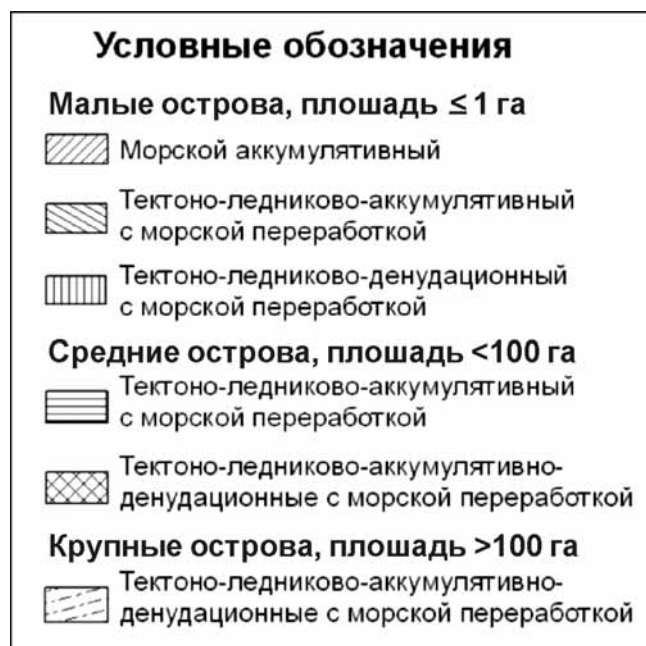


Рис. 6. Условные обозначения к рис. 5

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Авенариус И.Г. Морфоструктура Беломорского региона // Геоморфология. 2004. № 3. С. 48–56.

Балуев А.С. Геодинамика рифейского этапа эволюции северной пассивной окраины Восточно-Европейского кратона // Геотектоника. 2006. № 3. С. 23–38.

Балуев А.С., Журавлев В.А., Пржиялговский Е.С. Новые данные о строении центральной части палеорифтовой системы Белого моря // Докл. РАН. 2009а. Т. 427, № 3. С. 348–353.

Балуев А.С., Пржиялговский Е.С., Терехов Е.Н. Новые данные по тектонике Онежско-Кандалакшского палеорифта (Белое море) // Докл. РАН. 2009б. Т. 425, № 2. С. 249–252.

Болысов С.И. Эволюция биогенного рельефообразования. М.: ГЕОС, 2006. 270 с.

Булочникова А.С., Романенко Ф.А. Особенности рельефа малых островов Арктических и Дальневосточных морей // Природа шельфов и архипелагов Европейской Арктики. Вып. 10. М.: ГЕОС, 2010. С. 25–30.

Косевич Н.И. Геоморфологическая характеристика островов Лувеньгского архипелага, 2011 г. // Летопись природы Кандалакшского заповедника за 2011 год. Кн. 57, т. 1. Кандалакша, 2012. С. 27–65.

Косевич Н.И. Геоморфологическая характеристика островов Лувеньгского и Северного архипелагов,

ется преобладание только одного типа — тектоно-ледниково-аккумулятивно-денудационных островов с морской переработкой (рис. 5, 6).

2012 г. // Летопись природы Кандалакшского заповедника за 2012 год. Кн. 58, т. 1. Кандалакша, 2013. С. 35–93.

Косевич Н.И., Романовская М.А. Линеаменты и тектоника Кандалакшского залива Белого моря // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2014. № 4. С. 20–26.

Лымарев В.И. Основы острововедения: Монография / Под ред. Б.В. Ермолина. Архангельск: Поморский государственный университет, 2002. 192 с.

Невесский Е.Н., Медведев В.С., Калинин В.В. Белое море: седиментогенез и история развития в голоцене. М.: Наука, 1977.

Рыбалко А.Е., Зарина Е.П. Особенности седиментогенеза внутренних морей и крупных озер областей четвертичного оледенения // Мат-лы VI Всерос. совещ. по изучению четвертичного периода. Новосибирск, 2009. С. 523–527.

Слабунов А.И. Геология и геодинамика архейских подвижных поясов на примере Беломорской провинции Фенноскандинавского щита). Петрозаводск: КарНЦ РАН. 2008. 296 с.

Polyakova E.I., Novichkova Y., Shilova O., Bauch H. Holocene variability of the White Sea (Western Arctic) level and hydrological conditions: APEX Fourth Intern. Conf. and Workshope. Hofn, Iceland. May 26–30, 2010. 70 p.

Поступила в редакцию  
13.03.2015