УДК 551.14/.15(084.3)(98)

С. Н. КАШУБИН, О. В. ПЕТРОВ, Е. А. АНДРОСОВ (ВСЕГЕИ), А. Ф. МОРОЗОВ (Роснедра),
В. Д. КАМИНСКИЙ, В. А. ПОСЕЛОВ (ВНИИОкеангеология)

КАРТА МОЩНОСТИ ЗЕМНОЙ КОРЫ ЦИРКУМПОЛЯРНОЙ АРКТИКИ

Рассматривается методика составления карты мощности земной коры по материалам глубинных сейсмических исследований и аномалиям поля силы тяжести в Циркумполярной Арктике. Для построения карты использовано более 150 профилей общей протяженностью около 90 тыс. км и корреляционные уравнения, связывающие глубину залегания границы Мохо с аномалиями Буге и рельефом. Построенная по этим данным цифровая модель карты мощности земной коры Циркумполярной Арктики отличается большей детальностью. При ее составлении учтено существенно больше новых сейсмических материалов и не использовалось глобальное осреднение данных. Новая карта пригодна как для введения поправок при сейсмологических и планетарных геофизических построениях, так и для геотектонических построений в Арктическом бассейне.

Ключевые слова: *Циркумполярная Арктика, мощность земной коры, глубинные сейсмические исследования, аномалии Буге.*

Information on the crust thickness plays an important role in studying deep structure of the Earth. Knowledge of crustal thickness is required for calculating the corrections necessary for developing seismological and global geophysical models, as well as the change of crust thickness in zones of transition from continents to oceans often appears a definitive criterion for distinguishing the types of crust. Extensive seismic investigations performed in the Arctic in recent years enabled appreciable improving of the accuracy of previous compilations and made possible to develop a new digital model of the Earth's crust. All available deep seismic geotransects obtained during the 1960–2010 period north of 60° N were used. This dataset includes more than 150 seismic profiles totaling approximately 90,000 line km. New digital model of the Earth's crust thickness in the Circumpolar Arctic differs from previous models by a considerably higher detail level. The new map is suitable both for seismological corrections and global geophysical and geotectonic constructions in the Arctic basin.

Key words: *Circumpolar Arctic, Earth's crust thickness, deep seismic sounding, Bouger anomalies.*

Введение. Информация о мощности земной коры играет важную роль при изучении глубинного строения Земли. При сейсмологических и глобальных геофизических построениях знание мощности коры необходимо для расчета соответствующих поправок, а при геологической интерпретации мощность земной коры важно знать как для структурных, так и для геодинамических построений. При изучении областей перехода от континентов к океанам изменение мощности коры часто служит основным критерием для выделения континентального и океанического типов земной коры.

Мощность земной коры определяется прежде всего сейсмическими методами. Общепризнана методика глубинных сейсмических зондирований (ГСЗ), когда подошва земной коры отождествляется с границей Мохоровичича (М), рассчитанной по данным преломленных и закритических отраженных волн [19]. Иногда подошва земной коры выделяется на сейсмических разрезах, полученных методом отраженных волн (МОВ-ОГТ) [9], и по методике обменных волн удаленных землетрясений (МОВЗ) [3]. При отсутствии сейсмических данных мощность земной коры оценивается с помощью корреляционных соотношений между глубиной залегания поверхности М, топографией и аномалиями Буге [2, 6].

В рамках международного проекта «Атлас карт геологического содержания Циркумполярной Арктики масштаба 1 : 5 000 000» (BULLETIN 54 CGMW, 2006) Россия выступает страной-координатором при составлении Тектонической карты Арктики, одним из компонентов которой является карта мощности земной коры. На отдельные участки этой территории (севернее 60° с. ш.) уже были построены карты глубины залегания границы М по сейсмическим данным [10, 14, 20] и карты мощности земной коры с использованием аномального поля силы тяжести [1, 11, 12]. Однако из-за редкой сети сейсмических профилей в Арктике и отсутствия представительных данных о связи мощности земной коры с аномалиями поля силы тяжести эти разрозненные карты сильно отличались одна от другой. Единственная же карта глубин залегания границы М на всю территорию Циркумполярной Арктики (CRUST 2.0), составленная на основе глобальной модели 2°г2° [17], слишком груба для целей тектонического районирования этой территории.

За последние годы в Арктике выполнены значительные объемы сейсмических исследований [5,

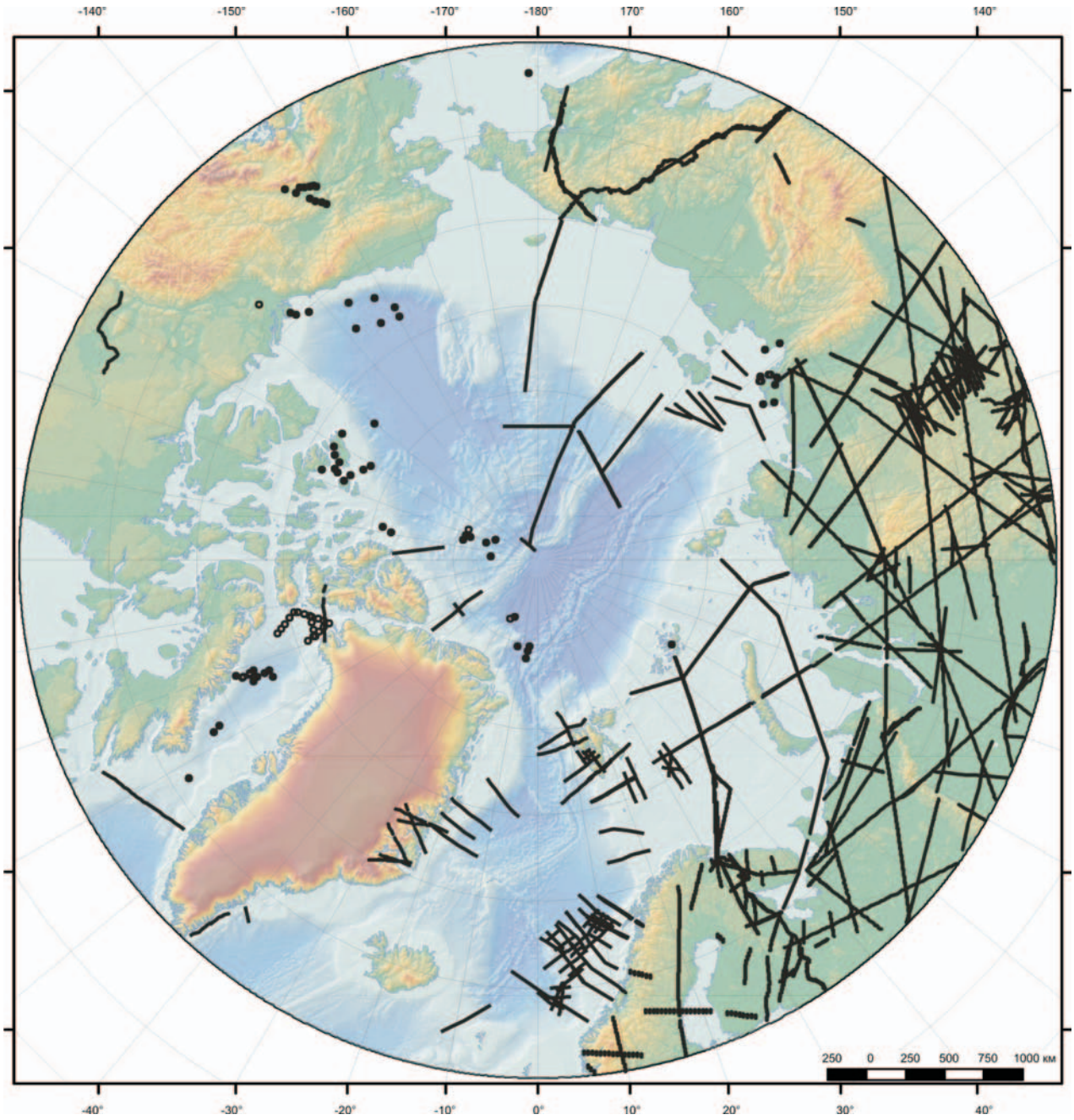

Рис. 1. Схема расположения профилей глубинных сейсмических исследований и точек определения глубин до границы М в Циркумполярной Арктике

7, 8], что позволило существенно повысить точность построений и создать новую цифровую модель карты мощности земной коры Циркумполярной Арктики.

Сейсмические данные. Для построения новой версии карты использованы все доступные глубинные сейсмические разрезы севернее 60° с. ш., созданные нашими предшественниками с 1960 по 2010 г. Этот массив информации включает более 150 сейсмических разрезов общей протяженностью около 90 000 км (рис. 1). Примерно 75% разрезов составляют результаты исследований по методике ГСЗ, остальная часть представлена глубинными сейсмическими разрезами МОВ-ОГТ и МОВЗ.

Изученность Арктики глубинными сейсмическими методами крайне неравномерна (рис. 1). Плотность профилей на территории Северной Евразии и в Баренцевоморском регионе примерно 5 км на 1000 км^2, в то время как на севере Американского континента и в Канадской котловине практически нет профилей глубинных сейсмических исследований. Большая часть наблюдений (примерно 65 000 км) приходится на сушу, около 25 000 км профилей выполнено на акваториях.

Приведенный ниже перечень публикаций содержит описание более 150 глубинных разрезов. В перечень также входят описания более 20 разрезов (пока не опубликованы в открытой печати), любезно предоставленные нам Росгеолфондом и отдельными исследовательскими группами.

Аветистов Т.П., Голубков В.С. Глубинное строение центральной части Норильского района по данным ГСЗ – МОВЗ // Сов. геология. 1984. № 10. – С. 86–94.

Аветистов Т.П., Голубков В.С. Глубинное строение центральной части Норильского района по данным ГСЗ – МОВЗ // Геолого-геофизические характеристики литосферы Арктического региона. – СПб.: ВНИИОкеангеология. 1996. Вып. I. Ч. 2. – С. 186–197.

Беляевский Н.А., Вольвовский Б.С., Вольвовский - И.С. и др. Земная кора основных тектонических структур Запада СССР (по профилю Черное море – Карское море) // Геофизические исследования земной коры. – М.: Недра, 1976. – С. 48–58.

Берзин Р.Г., Заможняя Н.Г., Кулаков С.И. и др. Сейсмогеологическая модель земной коры по северному участку профиля I-ЕВ // Сейсмологическая модель литосферы Северной Европы / Ред. Ф.П. Митрофанов, Н.В. Шаров. – Апатиты: КНЦ РАН, 1998. Ч. 1. – С. 93–109.

Булин Н.К., Афанасьев К.А., Проняева Е.А. и др. Глубинный разрез юго-востока Сибирской платформы и ее складчатого обрамления по сейсмологическим данным // Сов. геология. 1972. № 10. – С. 134–140.

Булин Н.К., Афанасьева Г.А., Проняева Е.А. Профильные сейсмологические исследования в южной части Балтийского щита // Прикладная геофизика. 1972. Вып. 69. – С. 69–81.

Булин Н.К., Егоркин А.В. Многоволновое глубинное сейсмическое зондирование при мелкомасштабных прогнозных исследованиях // Отечеств. геология. 1994. № 4. – С. 43–50.

Булин Н.К., Егоркин А.В., Солодилов Л.Н. Прогнозирование нефтегазоносности недр по глубинным сейсмическим критериям // Регион. геология и металлогения. 2000. № 10. – С. 195–204.

Верба М.Л., Шаров Н.В. Состояние изученности и основные проблемы глубинного строения Баренцевского региона // Сейсмологическая модель литосферы Северной Европы: Баренцевский регион / Ред. Ф.П. Митрофанов, Н.В. Шаров. – Апатиты: КНЦ РАН, 1998. Ч. 1. – С. 11–41.

Вольвовский И.С., Вольвовский Б.С. Разрезы земной коры территории СССР по данным глубинного сейсмического зондирования. – М.: Советское радио, 1975. – 258 с.

Геотраверс «ГРАНИТ»: Восточно-Европейская платформа – Урал – Западная Сибирь (строение земной коры по результатам комплексных геолого-геофизических исследований) / Под ред. С.Н. Кашубина. – Екатеринбург, 2002. – 312 с.

Глазнев В.Н., Загородный В.Г., Скопенко Г.Б., Шаров Н.В. Балтийский щит: геологическое строение и история // Глубинное строение территории СССР / Ред. В.В. Белоусов, Н.И. Павленкова. – М.: Наука, 1991. – С. 21–31.

Детков В.А., Вальчак В.И., Горюнов Н.А., Евграфов А.А. Особенности строения земной коры и верхней мантии юга Сибирской платформы в сечении опорных маршрутов Батолит и Алтай – Северная Земля // Модели земной коры и верхней мантии по результатам глубинного сейсмопрофилирования: Материалы Междунар. научно-практич. семинара. – СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2007. – С. 26–31.

Дружинин В.С. Особенности глубинного строения Западно-Сибирской плиты по Ханты-Мансийскому профилю ГСЗ // Геология и геофизика. 1983. № 4. – С. 3–9.

Дружинин В.С., Каретин Ю.С., Кашубин С.Н. Глубинное геокартирование Уральского региона по данным ГСЗ // Регион. геология и металлогения. 2000. № 10. – С. 152–161.

Дружинин В.С., Карманов А.Б. Изучение строения земной коры северо-западной части Западно-Сибирской плиты // Сов. геология. 1985. № 9. – С. 39–48.

Егоркин А.В. Строение земной коры по сейсмическим геотравесам // Глубинное строение территории СССР / Ред. В.В. Белоусов, Н.И. Павленкова. – М.: Наука, 1991. – С. 118–135.

Егоркин А.В., Акиншина Л.В., Артёменко Л.С. и др. Строение кристаллической коры Сибири по линии Ханты-Мансийск – Лена // Разведка и охрана недр. 2002. № 2. – С. 33–35.

Егоркин А.В., Данилова Э.Г., Зюганов С.К. и др. Вилюйская синеклиза // Сейсмические модели литосферы основных геоструктур территории СССР. – М.: Наука, 1980. – С. 96–98.

Егоркин А.В., Зюганов С.К., Павленкова Н.А., Чернышев Н.М. Результаты исследований структуры литосферы на профилях в Сибири // Геология и геофизика. 1988. № 5. – С. 120–128.

Егоркин А.В., Чернышев Н.М., Данилов Е.Г. и др. Региональное сечение через север Азиатского континента, профиль Воркута – Тикси // Сейсмические модели литосферы основных геоструктур территории СССР. – М.: Наука, 1980. – С. 61–67.

Золотов Е.Е., Костюченко С.Л., Ракитов В.А. Томографические разрезы литосферы Восточно-Европейской платформы // Сейсмологическая модель литосферы Северной Европы: Баренцевский регион / Ред. Ф.П. Митрофанов, Н.В. Шаров. – Апатиты: КНЦ РАН, 1998. Ч. 1. – С. 71–79.

Исанина Э.В., Крупнова Н.А., Шаров Н.В. Сейсмологические исследования МОВЗ на юге Карелии // Глубинное строение и сейсмичность Карельского региона и его обрамления / Ред. Н.В. Шаров. – Петрозаводск: Карельский НЦ РАН, 2004. – С. 60–76.

Исанина Э.В., Шаров Н.В. и др. Атлас региональных сейсмических профилей Европейского Севера России. – СПб.: Росгеофизика, 1995.

Костюченко С.Л. Структура и тектоническая модель земной коры Тимано-Печорского бассейна по результатам комплексного геолого-геофизического изучения // Тектоника и магматизм Восточно-Европейской платформы: Материалы Междунар. совещ. «Внутриплитная тектоника и геодинамика осадочных бассейнов». – М.: Фонд «Наука России», Гео-Инвэкс, 1994. – С. 121–133.

Костюченко С.Л. Структура коры и глубинные механизмы формирования приарктических континентальных осадочных бассейнов Сибири // Регион. геология и металлогения. 2000. № 10. – С. 125–135.

Костюченко С.Л., Егоркин А.В. Внутрикоровые элементы севера Восточно-Европейской платформы // Разведка и охрана недр. 1994. № 10. – С. 12–15.

Литвиненко И.В., Анкудинов С.А., Гаврилов И.А. и др. Глубинный разрез земной коры Центральной Карелии и его сейсмическая модель // Записки ЛГИ. 1981. Т. 89. – С. 12–17.

Матвеев Ю.И., Верба М.Л., Липилин А.В., Рослов Ю.В. Глубинные сейсмические исследования в Баренцево-Карском регионе // Модели земной

коры и верхней мантии по результатам глубинного сейсмопрофилирования: Материалы Междунар. научно-практич. семинара. – СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2007. – С. 90–93.

Мильштейн Е.Д., Никитин А.А., Каличева Т.И. и др. Комплексная геолого-геофизическая модель глубинного строения Восточной Фенноскандии (по материалам сейсмического профилирования, гравиметрическим и магнитным данным) // Модели земной коры и верхней мантии по результатам глубинного сейсмопрофилирования: Материалы Междунар. научно-практич. семинара. – СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2007. – С. 99–105.

Минц М.В., Сулейманов А.К., Заможняя Н.Г., Ступак В.М. Объемная модель глубинного строения Карело-Беломорской области Фенноскандинавского щита: профили 1ЕВ, 4В, FIRE1 // Модели земной коры и верхней мантии по результатам глубинного сейсмопрофилирования: Материалы Междунар. научно-практич. семинара. – СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2007. – С. 115–119.

Поселов В.А., Каминский В.Д., Аветисов Г.П. и др. Глубинное строение континентальной окраины района поднятия Менделеева (Восточная Арктика) по результатам геолого-геофизических исследований на опорном профиле «АРКТИКА 2005» // Модели земной коры и верхней мантии по результатам глубинного сейсмопрофилирования: Материалы Междунар. научно-практич. семинара. – СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2007. – С. 163–167.

Поселов В.А., Каминский В.Д., Иванов В.Л. Строение и эволюция земной коры области сочленения поднятий Амеразийского суббассейна с Восточно-Арктическим шельфом // Строение и история развития литосферы. – М.: Paulsen, 2010. – С. 599–637.

Потапьев С.В. Авиасейсмические исследования земной коры. – М.: Наука, 1977. – 170 с.

Сакулина Т.С., Верба М.Л., Иванова Н.М. и др. Глубинное строение северной части Баренцево-Карского региона вдоль опорного профиля 4АР (п-ов Таймыр – Земля Франца Иосифа) // Модели земной коры и верхней мантии по результатам глубинного сейсмопрофилирования: Материалы Междунар. научно-практич. семинара. – СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2007. – С. 197–200.

Самков В.В., Потапьев С.В. Интерпретация гравитационного поля и данных глубинного сейсмического зондирования // Строение земной коры Анабарского щита. – М.: Наука, 1986. – С. 143–154.

Сулейманов А.К., Берзин Р.Г., Заможняя Н.Г., Липилин А.В. Результаты комплексных глубинных геолого-геофизических исследований Восточно-Европейского кратона (опорный геофизический профиль 1ЕВ) // Модели земной коры и верхней мантии по результатам глубинного сейсмопрофилирования: Материалы Междунар. научно-практич. семинара. – СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2007. – С. 215–223.

Сулейманов А.К., Заможняя Н.Г., Андрющенко Ю.Н., Липилин А.В. Глубинные сейсмические исследования отраженными волнами // Структура и строение земной коры Магаданского сектора России по геолого-геофизическим данным: Сб. науч. тр. / Отв. ред. А.С. Сальников. – Новосибирск: Наука, 2007. – С. 22–26.

Сурков В.С., Кузнецов В.Л., Старосельцев В.С., Сальников А.С. Сейсмическая томография при изучении земной коры Сибири // Регион. геология и металлогения. 2000. № 10. – С. 117–124.

Сурков В.С., Сальников А.С., Кузнецов В.Л. и др. Строение земной коры по опорному профилю 2ДВ (северо-восток России) по данным новой технологии глубинных сейсмических зондирований // Модели земной коры и верхней мантии по результатам глубинного сейсмопрофилирования: Материалы Междунар. научно-практич. семинара. – СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2007. – С. 233–236.

Шаров Н.В., Куликов В.С., Куликова В.В. и др. Сейсмогеологическая характеристика земной коры юго-восточной части Фенноскандинавского щита (Россия) // Геофизический журнал. 2010. № 3. Т. 32. – С. 3–17.

Azbel I.Ya., Buyanov A.F., Ionkis V.T. et al., 1989. Crustal structure of the Kola Peninsula from inversion of deep seismic sounding data // Tectonophysics. 162. 87–99.

Bohnhoff M., Makris J., 2004. Crustal structure of the southeastern Iceland-Faeroe Ridge (IFR) from wide aperture seismic data // J. of Geodynamics. 37. 2. 233–252.

Breivik A.J., Faleide J.I., Mjelde R., Flueh E.R., 2009. Magma productivity and early seafloor spreading rate correlation on the northern Vøring Margin, Norway – Constraints on mantle melting // Tectonophysics. 468. 206–223.

Breivik A.J., Mjelde R., Grogan P. et al., 2002. A possible caledonide arm through the Barents Sea imaged by OBS data // Tectonophysics. 355. 67–97.

Breivik A.J., Mjelde R., Grogan P. et al., 2003. Crustal structure and transform margin development south of Svalbard based on ocean bottom seismometer data // Tectonophysics. 369. 37–70.

Breivik A.J., Mjelde R., Grogan P. et al., 2005. Caledonide development offshore–onshore Svalbard based on ocean bottom seismometer, conventional seismic and potential field data // Tectonophysics. 401. 79–117.

Czuba W., Grad M., Guterch A. et al., 2008. Seismic crustal structure along the deep transect Horsted'05, Svalbard // Polish Polar Research. 29. 3. 279–290.

Dahl–Jensen T., Thybo H., Hopper J., Rosing M., 1998. Crustal structure at the SE Greenland margin from wide-angle and normal incidence seismic data // Tectonophysics. 288. 191–198.

Egorkin A.V., Zuganov S.K., Pavlenkova N.A., Chemyshev N.M., 1987. Results of lithospheric studies from long-range profiles in Siberia // Tectonophysics. 140. 29–47.

Faleide J.I., Tsikalas F., Breivik A.J. et al., 2008. Structure and evolution of the continental margin off Norway and the Barents Sea // Episodes. 31. 1. 82–91.

Franke D., Hinz K., Onchen O., 2001. The Laptev Sea Rift // Marine and Petroleum Geology. 18. 1083–1127.

Funck T., Jackson H.R., Dehler S.A., Reid I.D., 2004. A Refraction Seismic Transect from Greenland to Ellesmere Island, Canada: The Crustal Structure in Southern Nares Strait // Polarforschung. 74 (1–3). 97–112.

Funck T., Jackson H.R., Louden K.E., Klingelhofer F., 2007. Seismic study of the transform-rifted margin in Davis Strait between Baffin Island (Canada) and Greenland: What happens when a plume meets a transform // J. Geophys. Res. 112. B04402. 22.

Guggisberg B., Kaminski W., Prodehl C., 1991. Crustal structure of the Fennoscandian Shield: A traveltime interpretation of the long-range FENNOLORA seismic refraction profile // Tectonophysics. 195. 105–137.

Ivanova N.M., Sakoulina T.S., Roslov Yu.V., 2006. Deep seismic investigation across the Barents–Kara

region and Novozemelskiy Fold Belt (Arctic Shelf) // Tectonophysics. 420. 123–140.

Jackson H.R., Dahl–Jensen T., the LORITA working group, 2010. Sedimentary and crustal structure from the Ellesmere Island and Greenland continental shelves onto the Lomonosov Ridge, Arctic Ocean // Geophys. J. Int. 182. 11–35.

Larsen H.C., Dahl–Jensen T., Hopper J.R., 1998. Crustal structure along the Leg 152 drilling transect // Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results. 152. 463–476.

Lebedeva–Ivanova N.N., 2010. Geophysical Studies Bearing on the Origin of the Arctic Basin. Acta Universitatic Upsaliensis. Digital Comprehensive Summaries of Uppsala Dissertations from the Faculty of Science and Technology. 729. 80.

Lebedeva–Ivanova N.N., Zamansky Y.Ya., Langinen A.E., Sorokin M.Yu., 2006. Seismic profiling across the Mendeleev Ridge at 82°N: evidence of continental crust // Geophys. J. Int. 165. 527–544.

Ljones F., Kuwano A., Mjelde R. et al., 2004. Crustal transect from the North Atlantic Knipovich Ridge to the Svalbard Margin west of Hornsund // Tectonophysics. 378. 17–41.

Luosto U., Flueh E.R., Lund C.-E., Working group, 1989. The crustal structure along the POLAR Profile from seismic refraction investigations // Tectonophysics. 162. 51–85.

Malr J.A., Forsyth D.A., 1982. Crustal structures of the Canada basin near Alaska, the Lomonosov ridge and adjoining basins near the North Pole // Tectonophysics. 89. 239–253.

Mjelde R., Faleide J.I., Breivik A.J., Raum T., 2009. Lower crustal composition and crustal lineaments on the Vøring Margin, NE Atlantic: A review // Tectonophysics. 472. 183–193.

Mjelde R., Sellevoll M.A., Shimamura H. et al., 1992. A crustal study off Lofoten, N. Norway, by use of 3-component Ocean Bottom Seismographs // Tectonophysics. 212. 269–288.

Mjelde R., Shimamura H., Kanazawa T. et al., 2003. Crustal lineaments, distribution of lower crustal intrusives and structural evolution of the Vøring Margin, NE Atlantic; new insight from wide-angle seismic models // Tectonophysics. 369. 199–218.

Moisio K., Kaikkonen P., 2001. Geodynamics and rheology of the lithosphere along the DSS profile SVEKA in the central Fennoscandian Shield // Tectonophysics. 340. 61–77.

Ritzmann O., Jokat W., 2003. Crustal structure of northwestern Svalbard and the adjacent Yermak Plateau: evidence for Oligocene detachment tectonics and non-volcanic breakup // Geophys. J. Int. 152. 139–159.

Ritzmann O., Jokat W., Czuba W. et al., 2004. A deep seismic transect from Hovgard Ridge to northwestern Svalbard across the continental-ocean transition: A sheared margin study // Geophys. J. Int. 157. 683–702.

Roslov Yu.V., Sakoulina T.S., Pavlenkova N.I., 2009. Deep seismic investigations in the Barents and Kara Seas // Tectonophysics. 472. 301–308.

Sakoulina T.S., Telegin A.N., Tikhonova I.M. et al. The results of Deep Seismic Investigaition on Geotravers in the Barents Sea from Kola peninsula to Franz-Jozeph Land // Tectonophysics. 2000. 329. 319–331.

Schmidt–Aursch M., 2002. The crustal structure of the East Greenland Fjord Region between the Precambrian shield and the recent mid-oceanic ridges: Results from seismic and gravity modelling. Berichte zur Polarforschung, Alfred Wegener Institute for Polar and Marine Research, Bremerhaven, 145.

Sellevoll M.A., Duda S.J., Guterch A. et al., 1991. Crustal structure in the Svalbard region from seismic measurements // Tectonophysics. 189. 55–71.

Tsikalas F., Eldholm O., Faleide J.I., 2005. Crustal structure of the Lofoten–Vesteralen continental margin, off Norway // Tectonophysics. 404. 151–174.

Voss M., Jokat W., 2007. Continent–ocean transition and voluminous magmatic underplating derived from P-wave velocity modelling of the East Greenland continental margin // Geophys. J. Int. 170. 580–604.

Voss M., Schmidt–Aursch M.C., Jokat W., 2009. Variations in magmatic processes along the East Greenland volcanic margin // Geophys. J. Int. 177. 755–782.

Yliniemi J., Kozlovskaya E., Hjelt S.-E. et al., SVEKALAPKO Seismic Tomography Working Group, 2004. Structure of the crust and uppermost mantle beneath southern Finland revealed by analysis of local events registered by the SVEKALAPKO seismic array // Tectonophysics. 394. 41–67.

Zehnder C.M., Mutter J.C., Buhl P., 1990. Deep seismic and geochemical constraints on the nature of rift-induced magmatism during breakup of the North Atlantic // Tectonophysics. 173. 545–565.

Корреляция между глубиной залегания границы М, рельефом земной поверхности и аномалиями Буге. Анализ изученности показывает, что на значительной части рассматриваемой территории не проводилось глубинных сейсмических наблюдений, поэтому для построения карты необходима дополнительная информация, в частности данные по полю силы тяжести. Для получения более однородной информации о глубинном строении региона исследована корреляция между глубиной залегания границы М, топографией и аномалиями поля силы тяжести, сглаженными с различными радиусами осреднения. С целью увеличения представительности данных при корреляционном анализе использовались материалы сейсмических наблюдений не только по Циркумполярной области, где перепады исследуемых параметров, особенно на суше, не столь велики, но и результаты исследований по всей Евразии, включая высокогорные территории складчатых областей. Установлено, что наибольшей теснотой связи с глубиной залегания границы М отличаются значения рельефа и аномалий Буге с плотностью промежуточного слоя 2,67 г/см^3, осредненные в радиусе 100 км. Поле регрессии глубины залегания границы М (Zм в км), отметки рельефа, осредненные в радиусе 100 км (h_{100} в м), и аномалии Буге, осредненные в радиусе 100 км (G_{100} в мГл), приведены на рис. 2.

Между исследуемыми величинами существует достаточно тесная корреляционная связь. Четко видно, что наклон осредняющих кривых для суши и для моря заметно отличается в плоскости Zм, G_{100} (рис. 2, *б*), оставаясь практически неизменным в плоскости Zм, h_{100} (рис. 2, *в*). По-видимому, это обусловлено тем, что на суше и на акватории выбранная редукция Буге по-разному связана с рельефом (рис. 2, *г*). Были определены два уравнения множественной регрессии, связывающие значения искомой глубины до границы М с известными значениями отметок рельефа и аномалий Буге: одно для суши ($h_{100} > 0$), а второе для акваторий $h_{100} < 0$ (таблица). Оба уравнения характеризуются близкими значениями множественных коэффициентов корре-

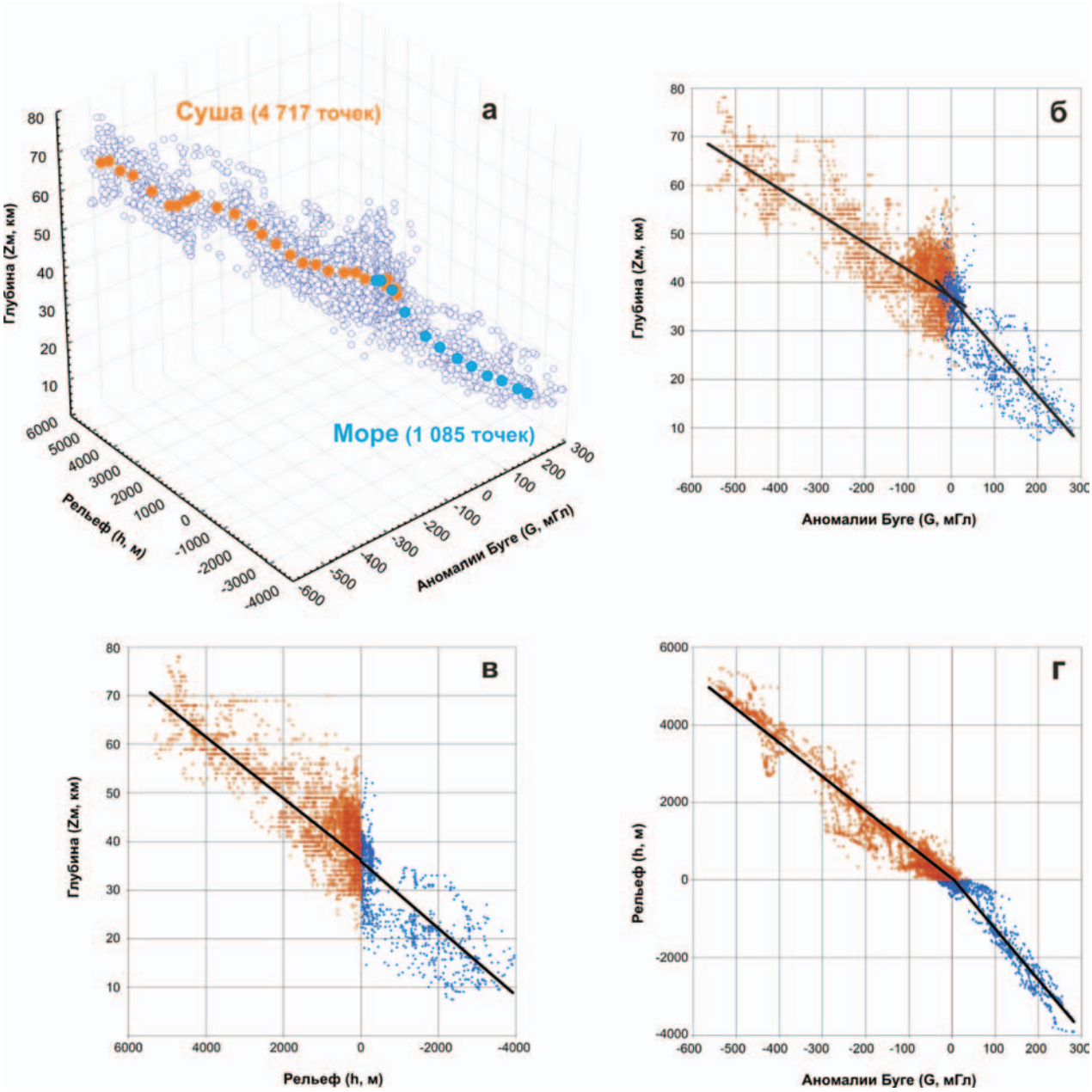

Рис. 2. Корреляция между глубиной залегания границы М, аномалиями поля силы тяжести и рельефом

а – поле регрессии Zм, G и h, где Zм – глубина границы М (в км), G – аномалии Буге, осредненные в радиусе 100 км (в мГл), h – отметки рельефа, осредненные в радиусе 100 км (в м); *б, в, г* – проекции поля регрессии на соответствующие плоскости

ляции, равными 0,83–0,84, и дают среднеквадратическую погрешность определения Zм ±5 км.

Методика построения сводной карты мощности земной коры и оценка погрешностей. Карта мощности земной коры строилась в несколько этапов. Сначала значения глубины до границы М, снятые с сейсмических разрезов с шагом 25 км, были вынесены на карту фактического материала: по сейсмическим данным около 1000 значений Zм в пределах акватории Северного Ледовитого океана и прилегающих морей и примерно 2600 значений глубин до границы М, определенных в континентальной части Циркумполярной Арктики.

Для заполнения значениями глубин до границы М межпрофильного пространства и обширных территорий, где сейсмические данные полностью отсутствуют, использовались цифровые макеты карты аномального поля силы тяжести [13] и рельефа дневной поверхности и глубин дна океана (IBCAO ver 2.23). По осредненным в радиусе 100 км значениям аномалий Буге и отметок рельефа по формулам, приведенным в таблице, рассчитывались глубины Zм отдельно для континентальной и морской части территории по сети 10 × 10 км. Полученные цифровые массивы сведены в один по границе береговой линии с последующей увязкой изолиний в области их сочленения. На основе скорректированных данных проведен расчет нового цифрового массива, который был объединён с ранее существовавшими цифровыми картами глубин залегания границы М [10, 14, 20]. Итоговая карта представле-

Эмпирические выражения для расчета глубины залегания границы М по отметкам рельефа и аномалиям Буге

Уравнение	Интервал изменения значений		
	$Z_М$, км	G_{100}, мГл	h_{100}, м
$Z_М = 36,3 - 0,038G_{100} + 0,003h_{100}$	20,0...80,0	–560...+35	0...5400
$Z_М = 36,3 - 0,137G_{100} + 0,003h_{100}$	7,5...48,0	–30...+280	–4200...0

на в виде цифровой модели Zм с размером ячейки 10 × 10 км для всей территории исследований.

Погрешность интерполяции при пересчете значений глубин Zм в равномерный шаг оценивалась путем сравнения интерполированных и исходных значений по 3600 точкам, где значения глубин выносились по сейсмическим данным. Среднеквадратическое отклонение между интерполированными и исходными значениями ±1,7 км, а сечение между изолиниями на результирующей карте 5 км.

После вычитания значений глубины океана и введения поправок за высоту наблюдения на суше карта значений глубин до границы М была преобразована в карту мощности земной коры Циркумполярной Арктики (рис. 3).

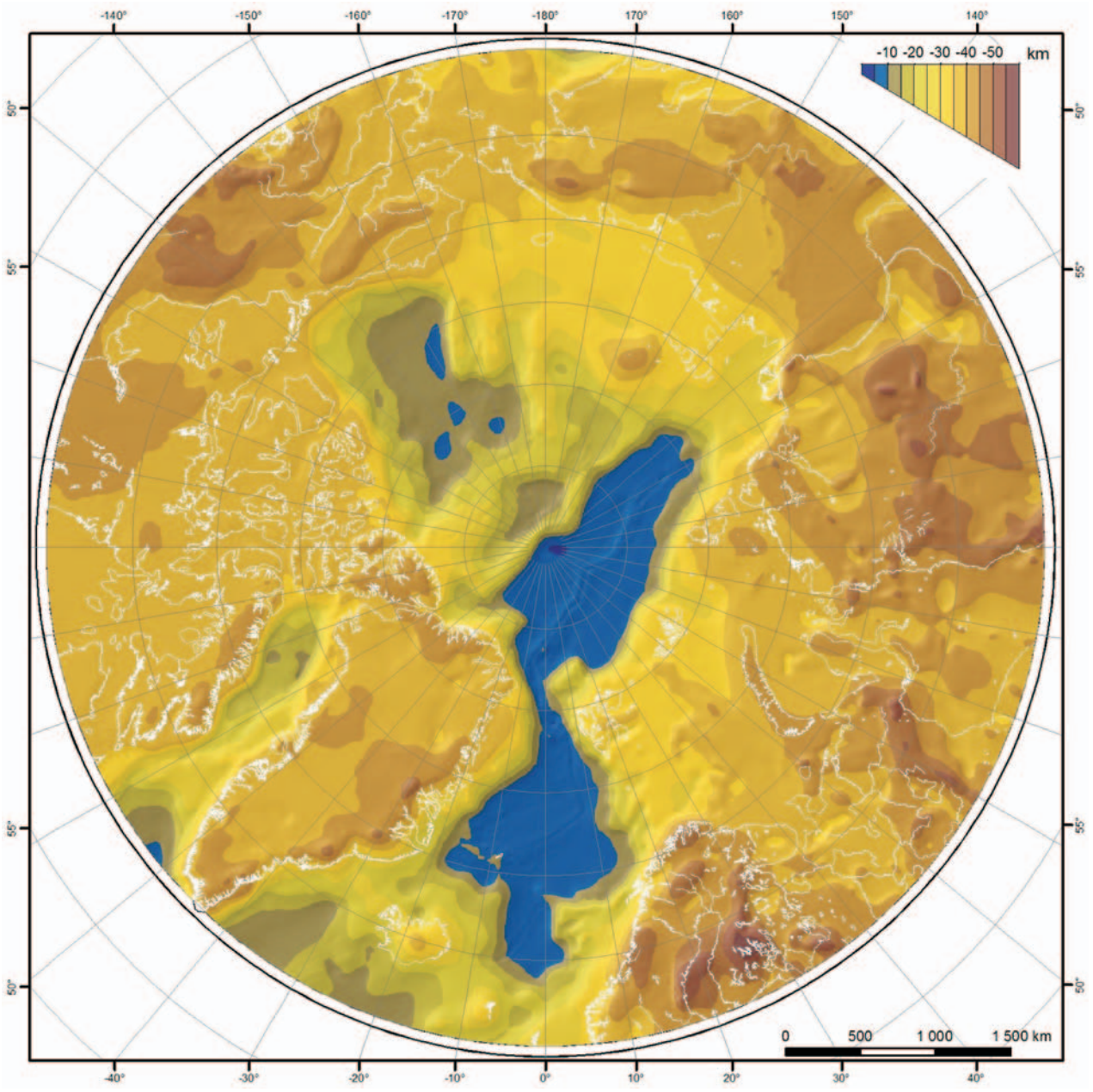

Рис. 3. Карта мощности земной коры Циркумполярной Арктики

Обсуждение. Ключевым моментом в карте мощности земной коры Арктического бассейна является строение области Центрально-Арктических поднятий, включающей хребет Ломоносова, систему поднятий Менделеева-Альфа и разделяющих их котловины Подводников-Макарова, Чукотского свода и хребта Нортвинд. Впервые для построения карты мощности земной коры Центрально-Арктических поднятий и области их сочленения со структурами Евразийской и Северо-Американской континентальных окраин использовались материалы российских и зарубежных глубинных сейсмических исследований «Трансарктика-1989–92», «Арктика-2000», «Арктика-2005», «Арктика-2007», «Arta-2008 on the Alpha Ridge», «Lorita-2006 on the Lomonosov Ridge» [8, 16, 18].

Сейсмические данные указывают на то, что область Центрально-Арктических поднятий (за исключением котловины Макарова) характеризуется наименьшей степенью деструктивных преобразований континентальной коры. Наблюдается лишь ее утонение, связанное с рифтогенными преобразованиями континентальной коры при сохранении ее вертикальной расслоенности.

Так, на хребте Ломоносова мощность земной коры 17–19 км при равном соотношении верхней и нижней коры. В котловине Подводников-Макарова мощность коры изменяется от 19–21 км в южной части котловины Подводников до 7–8 км в северной части котловины Макарова. На поднятии Менделеева общая мощность коры 31–34 км при мощности верхней коры 4–7 км.

Имеющиеся геолого-геофизические материалы [4, 15] указывают на то, что хребет Нортвинд и Чукотский свод представляют собой относительно неглубоко погруженный аваншельфовый выступ континентальной коры.

Таким образом, область Центрально-Арктических поднятий и Евразийская и Северо-Американская континентальные окраины – это единый ансамбль континентальных геологических структур с общей историей геологического развития. Деление этого ансамбля на шельфовую и глубоководную части произошло в результате неотектонического погружения центральной части Арктического бассейна. Настоящий уровень изученности Арктического бассейна существенных фактологических данных о структурной изолированности области Центрально-Арктических поднятий от сопредельных континентальных окраин не известен.

Заключение. Построенная нами цифровая модель карты мощности земной коры Циркумполярной Арктики отличается от имевшейся на эту территорию глобальной модели CRUST2.0 [17] существенно большей детальностью. Во-первых, нам удалось привлечь для ее составления гораздо больше новых сейсмических материалов, во-вторых, мы попытались избежать глобального осреднения данных при построении карты.

Мощность земной коры в Циркумполярной Арктике меняется весьма значительно – от 5–10 км в пределах Норвежско-Гренландского и Евразийского океанических бассейнов до 55–60 км в Скандинавии и на Урале (рис. 3). Достаточно уверенно на карте мощности земной коры выделяются области океанической и континентальной коры, при этом размеры и конфигурация отдельных латеральных вариаций мощности вполне сопоставимы с размерами региональных геологических структур. Новая карта, по нашему мнению, не только пригодна для введения поправок при сейсмологических и планетарных геофизических построениях, но может быть использована и для геотектонических построений в Арктическом бассейне.

Авторы благодарят своих коллег В. Ю. Глебовского, В. В. Буценко, С. М. Жолондза, Е. Д. Мильштейн, В. Н. Мухина, Ю. М. Эринчека за большой вклад в обработку исходных данных и плодотворные идеи по методике построения карты. Мы признательны специалистам Росгеолфонда и российских геолого-геофизических предприятий НПП «Севморгео» и институтов ВНИИГеофизики, СНИИГГиМС, Баженовской геофизической экспедиции, ИФЗ РАН за подбор сейсмических данных, а также представителям геологических служб Канады и Дании R. Jackson и T. Funck за предоставленные материалы.

1. *Верба В. В., Волк В. Э., Каминский В. Д., Ким Б. И.* Потенциальные поля Северного Ледовитого океана и их связь с особенностями строения земной коры // Геологическое строение и геоморфология Северного Ледовитого океана в связи с проблемой внешней границы континентального шельфа Российской Федерации в Арктическом бассейне. – СПб.: ВНИИОкеангеология, 2000. – С. 73–84.

2. *Деменицкая Р. М.* Кора и мантия Земли. – М.: Недра, 1967.

3. *Золотов Е. Е., Костюченко С. Л., Ракитов В. А.* Томографические разрезы литосферы Восточно-Европейской платформы // Сейсмологическая модель литосферы Северной Европы: Баренцевский регион / Ред. Ф. П. Митрофанов, Н. В. Шаров. – Апатиты: КНЦ РАН, 1998. Ч. 1. – С. 71–79.

4. *Кабаньков В. Я., Андреева И. А., Иванов В. И., Петрова В. И.* О геотектонической природе системы центрально-арктических морфоструктур и геологическое значение донных осадков в ее определении // Геотектоника. 2004. № 6. – С. 33–48.

5. *Каминский В. Д.* Глубинное строение Центрального Арктического бассейна (в связи с обоснованием внешней границы континентального шельфа Российской Федерации и оценкой углеводородных ресурсов): Дис. ... доктора г.-м. наук. – ВНИИОкеангеология, 2009.

6. *Кунин Н. Я., Гончарова Н. В., Семенова Г. И.* и др. Карта рельефа поверхности мантии Евразии. – М.: ИФЗ АН СССР, Мингео РСФСР, 1987.

7. *Матвеев Ю. И., Верба М. Л., Липилин А. В., Рослов Ю. В.* Глубинные сейсмические исследования в Баренцево-Карском регионе // Модели земной коры и верхней мантии по результатам глубинного сейсмопрофилирования: Материалы Междунар. научно-практич. семинара. – СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2007. – С. 90–93.

8. *Поселов В. А., Верба В. В., Жолондз С. М.* Типизация земной коры центрально-арктических поднятий Северного Ледовитого океана // Геотектоника. 2007. № 4.

9. *Сулейманов А. К., Берзин Р. Г., Заможняя Н. Г., Липилин А. В.* Результаты комплексных глубинных геолого-геофизических исследований Восточно-Европейского кратона (опорный геофизический профиль 1ЕВ) // Модели земной коры и верхней мантии по результатам глубинного сейсмопрофилирования: Материалы Междунар. научно-практич. семинара. – СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2007. – С. 215–223.

10. *Эринчек Ю. М., Мильштейн Е. Д., Егоркин А. В., Верба В. В.* Строение раздела Мохо территории России и прилегающих акваторий // Модели земной коры и верхней мантии по результатам глубинного сейсмопрофилирования: Материалы Междунар. научно-практического семинара. – СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2007. – С. 241–244.

11. *Alvey A., Gaina C., Kusznir N. J., Torsvik T. H.*, 2008. Integrated crustal thickness mapping and plate reconstructions for the high Arctic // Earth and Planet. Sci. Lett. 274. 310–321.

12. *Braun A., Kim H. R., Csatho B., von Frese R. R. B.*, 2007. Gravity-inferred crustal thickness of Greenland // Earth and Planet. Sci. Lett. 262. 138–158.

13. *Gaina C.* and CAMP-GM working group, 2009. Gravity anomaly map of the Arctic. Geological Survey of Norway.

14. *Grad M., Tiira T.* and working group, 2007. The Moho depth of the European plate. http://www.seismo.helsinki.fi/mohomap, http://www.igf.fuw.edu.pl/mohomap2007.

15. *Grantz A., Clark D., Phillips R.* et al., 1998. Fanerozoic stratigraphy of Northwind rige, magnetic anomalies in the Canada basin and timeng of rifting in the Amerasian basin, Arctic ocean // Geol. Soc. Amer. Bull. 110. 6. 801–820.

16. *Jackson H. R., Dahl–Jensen T.*, the LORITA working group, 2010. Sedimentary and crustal structure from the Ellesmere Island and Greenland continental shelves onto the Lomonosov Ridge, Arctic Ocean // Geophys. J. Int. 182. 11–35.

17. *Laske G., Masters G., Reif C.*, 2000. CRUST 2.0: A new global crustal model at 2 x 2 degrees. http://igppweb.ucsd.edu/~gabi/rem.html.

18. *Lebedeva-Ivanova N. N., Zamansky Y. Ya., Langinen A. E., Sorokin M. Yu.*, 2006. Seismic profiling across the Mendeleev Ridge at 82°N: evidence of continental crust // Geophys. J. Int. 165. 527–544.

19. *Mooney W. D.*, 2007. Crust and Lithospheric Structure – Global Crustal Structure. Treatise on Geophysics, vol. 1: Seismology and Structure of the Earth / Eds. B. Romanowicz & A. Dziewonski. Elsevier, 2007. 361–417.

20. *Ritzmann O., Maercklin N., Faleide J. I.* et al., 2006. A 3D geophysical model of the crust in the Barents sea region: model construction and basement characterization. 28th Seismic Research Review: Ground-Based Nuclear Explosion Monitoring Technologies. 229–237.

Кашубин Сергей Николаевич – доктор г.-м. наук, профессор, директор, Центр глубинной геофизики ФГУП «ВСЕГЕИ». <Sergey_Kashubin@vsegei.ru>.

Петров Олег Владимирович – доктор экон. наук, канд. г.-м. наук, ген. директор, ФГУП «ВСЕГЕИ». <OPetrov@vsegei.ru>.

Андросов Евгений Александрович – ведущий геофизик ФГУП «ВСЕГЕИ». <Evgeniy_Androsov@vsegei.ru>.

Морозов Андрей Федорович – канд. г.-м. наук, зам. руководителя Федерального агентства по недропользованию (Роснедра).

Каминский Валерий Дмитриевич – доктор г.-м. наук, директор, ФГУП «ВНИИОкеангеология».

Поселов Виктор Антонович – доктор г.-м. наук, зам. директора, ФГУП «ВНИИОкеангеология».