

Глубинное строение и металлогения Северо-Онежского синклинория (Республика Карелия, Россия): корреляция геологических и сейсмических данных

© Н. В. Шаров¹, В. С. Куликов¹, Э. В. Исанина²,
Г. М. Дрогицкая³, В. И. Казанский⁴, 2013

¹Институт геологии Карельского научного центра РАН,
Петрозаводский государственный университет, Петрозаводск, Россия

²РГЭЦ – филиал ФГУПП «Урангео», Санкт-Петербург, Россия

³Институт геофизики НАН Украины, Киев, Украина

⁴Институт геологии рудных месторождений, петрографии,
минералогии и геохимии РАН, Москва, Россия

Поступила 13 февраля 2013 г.

Представлено членом редколлегии В. Д. Омельченко

Дослідження глибинної будови Північноонежського синклінорію на основі кореляції геологічних і сейсмічних даних спрямовано на встановлення зв'язків його поверхневих структур і рудних родовищ з локальними неоднорідностями кори і поділу кора—мантія. Розрізи МОХЗ характеризують геопростір як статистично (положення і кількість границь, зон розломів, блоковість), так і динамічно — стан напруженості, жорсткості контактів, тріщинуватість. Показано зв'язок сейсмічних параметрів з особливостями геологічної будови окремих блоків земної кори. Встановлено, що родовища просторово пов'язані з підвищеною потужністю андерплейтингового шару, де в палеопротерозої, ймовірно, відбувалася головна диференціація мантійних магматичних розплавів з відділенням флюїдних і рудних фаз. Вона створювала сприятливі умови для подальшого проникнення збагачених металами магматичних розплавів у верхні рівні кори.

The goal of the deep structural study of the North Onega synclinorium, based on correlation of geological and seismic data, is to establish the relation of its surface structure and ore deposits to local heterogeneities of the crust and the crust-mantle interface. ECWM sections characterize geospace both statistically (position and number of boundaries, fault zones and mosaicity) and dynamically (stressed and rigid state of contacts and fracturing). Seismic parameters are shown to be related to the geological structure of individual crustal blocks. The deposits have been found to be spatially related to the elevated thickness of the underplating layer, where the main differentiation of mantle magmatic melts, which resulted in the separation of fluid and ore phases, probably occurred in the Palaeoproterozoic. It created favorable conditions for the subsequent intrusion of metal-enriched magmatic melts into upper crustal levels.

Введение. Онежская палеопротерозойская геологическая структура (ОС) является уникальной, сравнительно хорошо обнаженной и изученной на территории Восточно-Европейской платформы. Она активно развивалась в интервале 2,5—1,7 млрд лет геологической истории. Ее территория площадью 40 тыс. км², расположенная на юго-востоке Карелии и прилегающих районах Ленинградской и Вологодской областей, рассматривается в качестве одного из важных мировых эталонов палеопротерозойского этапа истории Земли.

Интерес к ОС возник в XVII веке в связи с

развитием в России металлургии. Другим мощным толчком к ее освоению и изучению явилось начало строительства Санкт-Петербурга. Требовался гранит, мрамор, шунгит и другие строительные материалы. Известные архитектурные сооружения (Казанский, Исаакиевский соборы, Эрмитаж и др.) облицованы тивдийским и рускеальским мрамором, шокшинским кварцитом, нигозерским сланцем. В послевоенный период на территории ОС успешно проводились геолого-съёмочные работы и поиски урановых и других рудных месторождений. Открыты новые месторождения

хромитов, шунгитов, ванадия и других полезных ископаемых.

ФГУ НПЦ «Недра» в 2007—2009 гг. провело бурение в Кондопожском районе РК Онежской параметрической скважины (ОПС) до глубины 3537 м. Она вскрыла разрез нижнего докембрия, включающий граниты архейского фундамента и главные стратоны палеопротерозоя, представленные ятулийским, людиковийским и калевийским надгоризонтами. В процессе бурения также выполнена комплексная интерпретация материалов ГИС и ВСП. В интервале 2751—2944 м была вскрыта 193-метровая толща каменной соли палеопротерозойского возраста, что является уникальным событием для мировой геологической науки, требующим дальнейше-

го изучения и осмысления как с позиций ее генезиса, так и площадного распространения.

В предлагаемой статье сделана попытка по методике статистической обработки данных метода обменных волн землетрясений (МОВЗ) получить новые результаты сейсмогеологического моделирования Северо-Онежского синклинория, представить суммарные сведения о глубинных неоднородностях коры и раздела Мохоровичича. Выполнено сопоставление глубинного строения Кировоградского (Украина), Онежского (Карелия) и Печенгского (Мурманская обл.) палеопротерозойских рудных районов, на территории которых члены авторского коллектива принимали участие в совместных исследованиях.

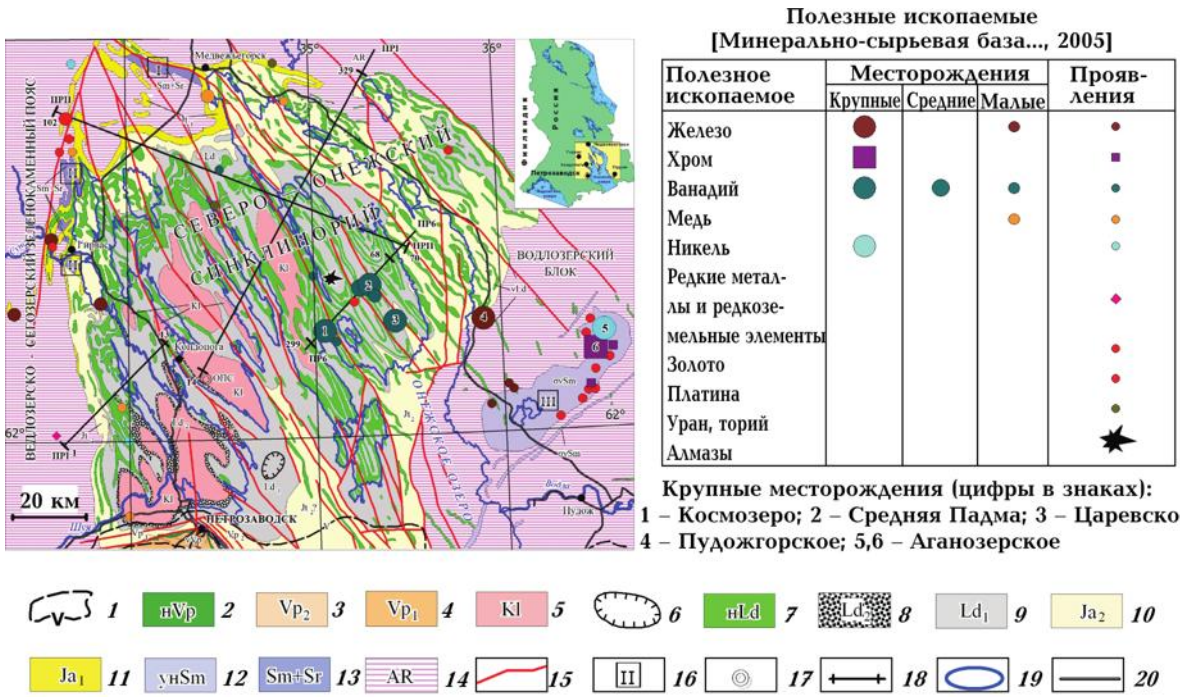


Рис. 1. Геологическая карта Северо-Онежского синклинория [Онежская..., 2011; Минерально-сырьевая..., 2005]. Неопротерозой: 1 — контуры вендских осадочных образований. Палеопротерозой. Вепсий (1,8—1,65 Ga); 2 — роупучейский комплекс. Габбродолериты, долериты, базальты, в т.ч. предполагаемые в акватории Онежского озера; 3 — шокшинский горизонт. Красноцветные кварцитопесчаники и кварциты, конгломераты; 4 — петрозаводский горизонт. Сероцветные песчаники, алевролиты, аргиллиты, конгломераты. Калевий (1,92—1,8 Ga); 5 — серо- и пестроцветные (иногда карбонат и углеродсодержащие) аргиллиты, алевролиты, кварцитопесчаники, конгломераты. Людиковий (2,1—1,92 Ga); 6 — наиболее интенсивная магнитная аномалия, вероятно, связанная с вулканическим центром людиковия; 7 — людиковийский и ятулийский магматические комплексы (нерасчлененные): перидотиты, габброиды, долериты, диориты и частично базальты; 8 — суйсарский горизонт. Пикриты, пикробазальты, базальты, туфы, туффимы и туфоконгломераты; 9 — заонежский горизонт. Шунгитоносные породы, аргеллиты, алевролиты, доломиты, базальты, андезитобазальты. Ятулий (2,3—2,1 Ga); 10 — онежский горизонт. Доломиты, гипсы, соли, ангидрит-магнетитовые породы, красноцветные алевролиты, базальты, долериты; 11 — сегозерский горизонт. Песчаники, кварцитопесчаники, аркозы, конгломераты, базальты, долериты. Сумий+Сариолий (2,5—2,3 Ga); 12 — бураковский комплекс. Дуниты, перидотиты, габбро-нориты, габбро, долериты, диориты; 13 — полимиктовые конгломераты, кварцитопесчаники, граувакки, базальты, андезитобазальты, туфы, туффиты. Архей (3,5—2,5 Ga); 14 — нерасчлененные метаморфиты по саамским и лолийским вулканогенным, магматогенным и осадочным образованиям; 15 — основные разломы; 16 — реликты (I — Кумсинский, II — Пальеозерский, III — Бураковский) сумийско-сариолийского рифтового пояса; 17 — Онежская параметрическая скважина (ОПС); 18 — фрагменты профилей МОВЗ (ПР1, ПР2, ПР6) и номера пикетов; 19 — контуры основных водоемов; 20 — основные дороги. Полезные ископаемые по Михайлову и др. [Минерально-сырьевая..., 2005].

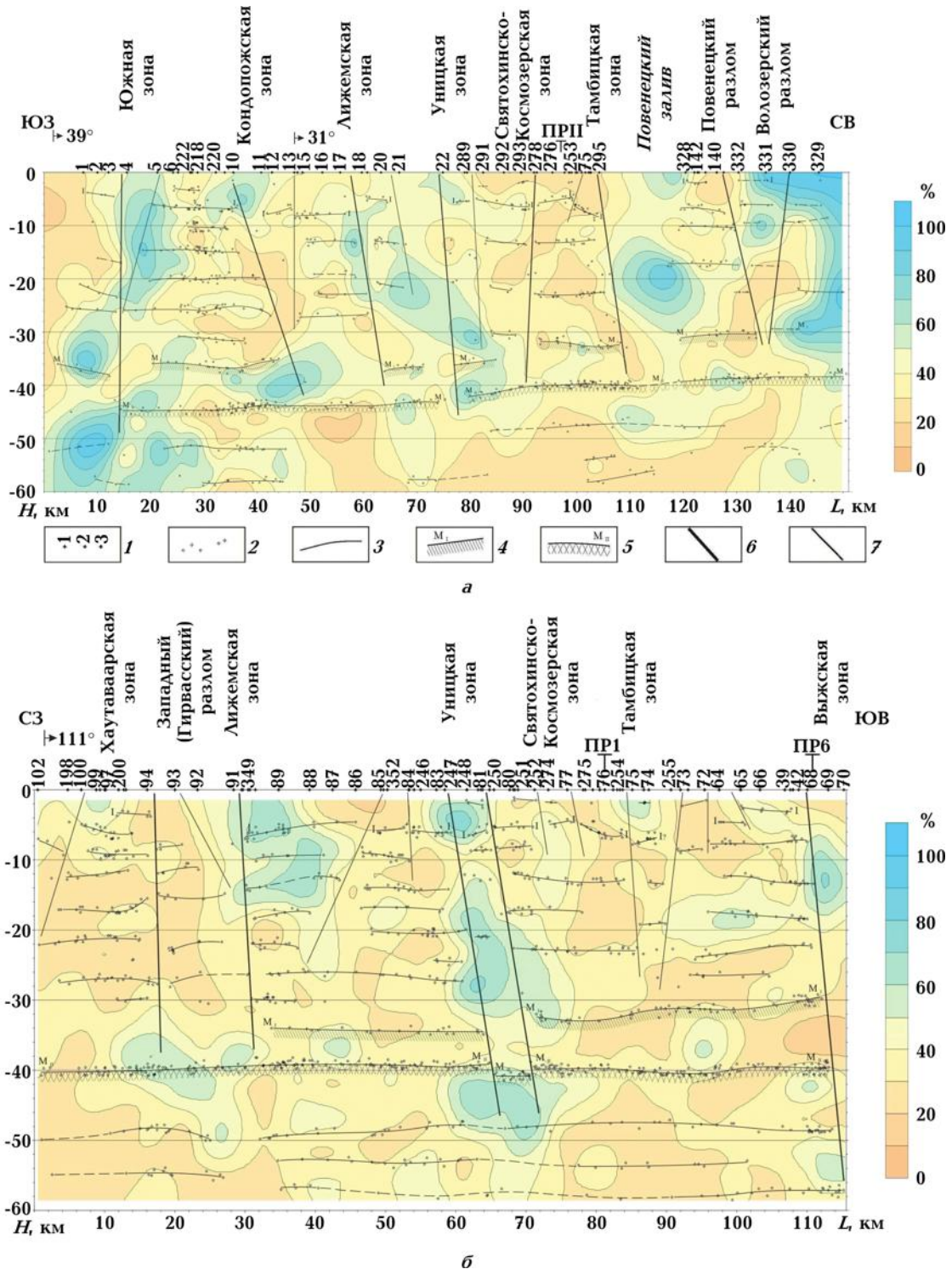
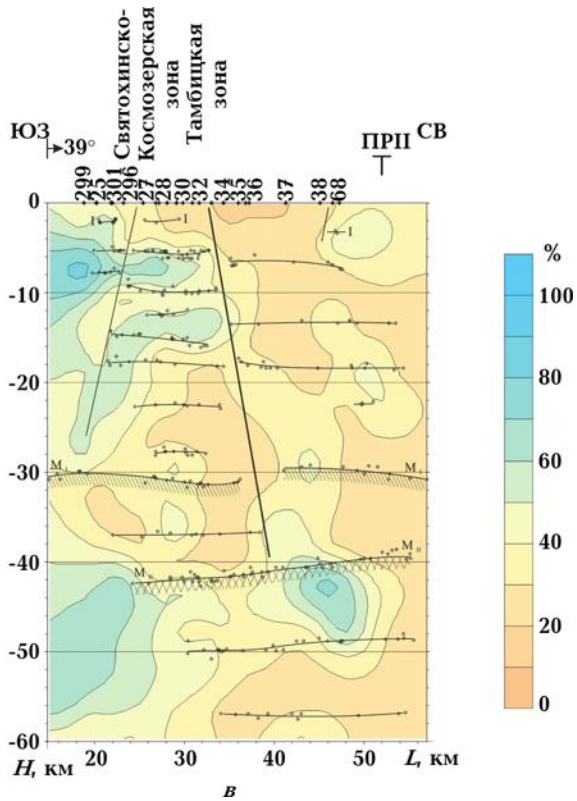


Рис. 2. Глубинные разрезы и обменоспособность среды в изолиниях A_{PS}/A_P — отношение амплитуды обменной волны к образовавшей ее продольной волне в % (Онежский рудный район, сост.: Э. В. Исанина, Г. М. Дрогицкая); а — профиль I (Сямозеро-Кондопога-Повенецкий залив); б — профиль II (Шайдома-Кажма-Заонежский залив); в — профиль б (Заонежский залив — Большое Онего); 1 — пункты сейсмологических наблюдений и их номера; 2 — точки проявления обменных волн; 3 — границы обменов; 4 — кровля зоны перехода кора — мантия; 5 — подошва зоны перехода кора — мантия; 6 — мантийные разломы, разрывающие границы M_1 и M_2 ; 7 — внутрикоровые разломы.



Основные черты геологического строения.

Северо-Онежский синклинорий площадью около 17 тыс. км² составляет северную половину ОС [Онежская..., 2011] или Онежского рудного района [Голубев, Новиков, 2005]. Синкли-

норий замыкается на севере в районе Медвежьегорска, а на юге — Петрозаводска (рис. 1). Он включает не менее восьми чередующихся синклиналей и антиклиналей, вытянутых в основном в северо-западном направлении и крутизной падения крыльев 5—20°. В восточной части (Заонежский полуостров) фиксируются псевдодиапировые структуры с крутыми (до субвертикальных) крыльями. Все эти структуры осложнены, в свою очередь, разрывными нарушениями, тоже преимущественно северо-западного простирания. По этим нарушениям местами наблюдаются горстовые блоковые поднятия, наиболее характерно выраженные на участке оз. Космозеро.

Северо-Онежский синклинорий сложен комплексом палеопротерозойских пород, представляющих собой как бы гигантский останец некогда широко развитого покрова протерозойских образований, перекрывающих архейский фундамент. В строении разреза палеопротерозоя принимают участие породы ятулийского, людиковийского и калевийского надгоризонтов [Онежская..., 2011].

Ятулийский надгоризонт возрастом 2,3—2,1 Ga залегает с угловым несогласием на архейском фундаменте и сумийско-сариолийских образованиях палеопротерозоя. Он представлен в нижней части (сегозерский горизонт) песчаниками, аркозами, кварцито-песчаниками и конгломератами (в основном, кварцевыми) и

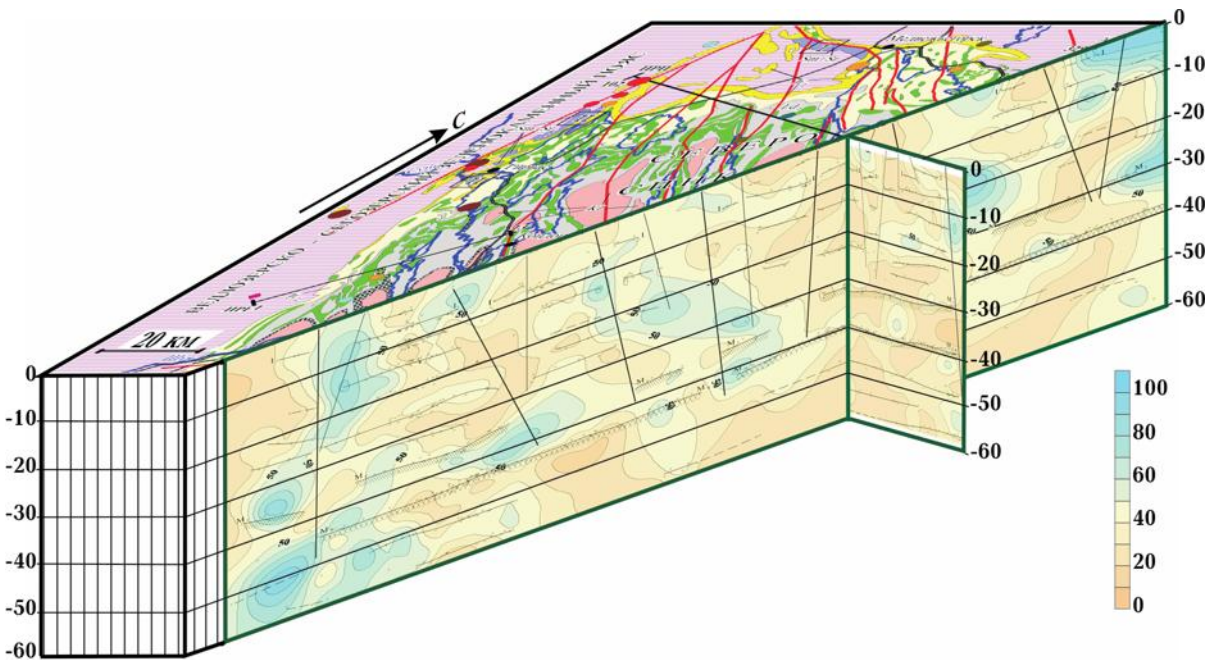


Рис. 3. 3D сейсмологическая модель распределения параметра A_{ps}/A_p Онежского рудного района.

платобазальтами, а в верхней (онежский горизонт) — доломитами, алевролитами, гипсами, солями ангидрит-магнезитовыми породами и редко базальтами.

Людикийский надгоризонт возрастом 2,1—1,92 Ga перекрывает ятулийский (местами несогласно) и характеризуется широким развитием углеродсодержащих (шунгитоносных) пород, аргиллитов, алевролитов, доломитов, базальтов и андезитобазальтов заонежского горизонта и существенно вулканитов (пикриты, базальты и их туфы) суйсарского горизонта. Широко развиты интрузивные комагматы силлы и дайки верлитов, долеритов в разной степени дифференцированные.

Калевийский надгоризонт возрастом 1,92—1,8 Ga отличается терригенным типом осадков (песчаники, алевролиты, аргиллиты) продуктов размыва подстилающих палеопротерозойских и архейских образований.

Полезные ископаемые Северо-Онежского синклинория как части Онежского рудного района (ОРР) представлены магматическими месторождениями хромитов и титаномagnetитов (см. рис. 1). Хромиты Аганозерского месторождения и рудопроявления благородных металлов связаны с крупнейшим в Европе Бураковским расслоенным мафит-ультрамафитовым плутоном. Титаномagnetиты с платиноидами и золотом характерны для Пудожгорского габбро-диоритового интрузива. Особое место занимают месторождения комплексных руд (Cu, U, Mo, V), которые приурочены к зонам структурно-разрывных дислокаций (СРД) [Голубев, Новиков, 2005; Минерально-сырьевая ..., 2006].

В настоящее время выделено семь зон. В них отмечаются повышенные до аномальных содержания Cu, Co, Ni, Cr, Zn, Mo, Bi, Au, Ag, Se, Pt, Pd и других элементов. Следует подчеркнуть, что процессы рудообразования, ведущими признаками которого служат проявления приразломного натриевого метасоматоза, слюдитизации и карбонатизации, а также перечисленный спектр аномальных концентраций элементов, контролируются осевыми разломами и зонами смятия в сочетании с пачками переслаивания контрастных по физико-механическим и геохимическим свойствам пород — доломитов, алевролитов, сланцев, базальтов и габбро-долеритов. Детальная характеристика зон СРД приведена А. В. Булавиным в монографии «Металлогения Карелии» [Металлогения..., 1999].

С уран-благороднометалльно-ванадиевой формацией зон СРД связываются наиболее

перспективные для промышленного освоения объекты [Машковцев и др., 2010]. Месторождения и проявления этой рудной формации локализируются в пределах Космозерского, Падминского и Шульгиновского рудных полей Онежского рудного района Онежско-Белозерской минерагенической зоны. Работами ГПП «Невскгеология» здесь были выявлены богатые, не имеющие мировых аналогов по содержанию ванадия, комплексные месторождения (Средняя Падма, Царевское, Весеннее, Верхняя Падма, Космозеро), а также проявления, которые локализованы в метасоматитах по углеродсодержащим алевролитам и сланцам основания заонежской свиты людикийского надгоризонта (см. рис. 1). Суммарные запасы и прогнозные ресурсы пентоксида ванадия по всем месторождениям и проявлениям Онежского рудного района оценены в 556 тыс. т, большая их часть (балансовые запасы кат $C_1+C_2 - 332,5$ тыс. т), сосредоточенная в месторождениях Падминского и Космозерского рудных полей, относится к категории так называемых активных запасов [Коровкин и др., 2003].

Методика и результаты сейсмических исследований МОВЗ. Сейсмические работы методом обменных волн от землетрясений (МОВЗ) в Онежском рудном районе были выполнены в 1980—1987 гг. с использованием стандартной методики проведения. Расстояние между точками наблюдений составляло 3—5 км, длительность наблюдений на каждой точке 24—30 дней (до полного набора необходимой информации). В 1998—1999 гг. в опытном порядке часть первичного материала была вновь обработана с использованием современных технологий. Однако технический прогресс позволяет на сегодняшний день получить из разнотипных данных путем более глубокой обработки широкий спектр информационных сведений о геологической среде. В 2012 г. часть сейсмического материала по трем профилям была пересмотрена. Построенные заново глубинные разрезы переобработаны с использованием программных пакетов «КОСКАД-3D» и Surfer 8 [Никитин и др., 2004].

Для обработки трех профилей МОВЗ (I, II, б) (рис. 2, а—в) в Северо-Онежском синклинории использована методика статистической обработки обменных волн землетрясений, предложенная и опробованная на сейсмическом материале ГП «Невскгеология» (1977—1980 гг.) [Старостенко и др., 2010] в Кировоградском рудном районе (Украинский щит). Резльтирующая схема объемного моделирования глубинного

строения Кировоградского рудного района по указанной методике представлена на рис. 3.

Исходные глубинные разрезы МОВЗ по ОРР [Шаров и др., 2011; Онежская ..., 2011] более убедительны, чем в Кировоградском рудном районе. На них уверенно прослежены отдельные довольно протяженные границы в коре, а также поверхности M_I и M_{II} , соответствующие кровле и подошве переходной зоны кора—мантия, четко картируются зоны нарушений различной глубины заложения.

Кроме информации о плотности распределения точек обмена по профилю особый интерес представляет динамический параметр обменоспособность (О) среды A_{PS}/A_P , где A_{PS} — интенсивность обменной волны, A_P — интенсивность продольной волны. Этот параметр меньше зависит от условий проведения работ на профиле, времени наблюдения, расстояния между станциями и т. д. и является объективной характеристикой физического состояния границ и поверхностей обмена.

В Онежском, как и в Кировоградском рудном районе, зафиксированы резкие колебания значений этого параметра даже при прослеживании вдоль одной и той же границы. Данное обстоятельство может свидетельствовать об изменении физического состояния границ раздела по латерали. Довольно часто фиксируются значительные изменения обменоспособности среды вблизи зон нарушений, что, скорее всего, указывает на повышение флюидопотоков в зонах повышенных значений обменоспособности (так называемые «нежесткие контакты» [Яновская, Дмитриева, 1991]).

Для выделения и прослеживания на глубину отдельных блоков и областей повышенной и пониженной обменоспособности целесообразно осреднить или профильтровать исходные данные (табл. 1) подобно тому, как это делалось в Кировоградском рудном районе.

Т а б л и ц а 1. Плотность заполнения исходными данными обрабатываемых разрезов

Профиль	Площадь разреза, км ²	Кол-во наблюдений в профиле	Средняя плотность, км ²
I	9000	869	0,097
II	6900	1163	0,169
6	2520	303	0,144

Следует отметить, что количество обменных волн на построенном разрезе характери-

зует гомогенность или гетерогенность геологической среды, а интенсивность зависит от таких физических свойств среды, как трещиноватость, напряженность, жесткость, флюидонасыщенность и различие скоростных параметров на разных сторонах границ разделов. Статистический анализ исходных данных выполнен однотипно для всех трех профилей.

Значения параметра A_{PS}/A_P , в каждом из профилей были интерполированы методом Крайгинга в плоскости разреза на сеть 1×1 км. Полученные результаты интерполяции использованы для построения карт распределения данного параметра. Для фильтрации случайных для данного масштаба отклонений и генерализации основных тенденций поведения функции в разрезе поле интерполированных точек было осреднено в скользящем окне 5×5 км. Радиус осреднения близок к радиусу функции автокорреляции аномалии.

В табл. 2 для каждого из профилей приведены средние значения параметра A_{PS}/A_P (С), среднеквадратичные отклонения (S), верхний предел фоновых значений и нижний предел аномалии. При этом верхний предел фона вычисляется как $C+1,3\times S$ и нижний предел аномалии $C+2,5\times S$.

Т а б л и ц а 2. Результаты статистической обработки обменных волн землетрясений

Параметры	ПР1	ПРII	ПР6	Общие
Среднее значение	42,9	36,2	38,2	39,8
Среднеквадратичное отклонение	14,4	10	12,3	12,7
Верхний предел фона	61,6	49,2	54,2	56,3
Нижний предел аномалии	71,7	56,8	62,3	64,6

Построены трансформированные разрезы для трех профилей МОВЗ в изолиниях параметра A_{PS}/A_P (0—100 %) и представлены те же разрезы в изолиниях средних значений (С).

Из сопоставления с аналогичными данными по Кировоградскому рудному району [Старостенко и др., 2010; 2011] видно, что Онежский район характеризуется более высокими показателями параметра A_{PS}/A_P . Так, в Кировоградском среднее значение составляло 22,3 %, а в Онежском — почти в 2 раза выше 39,8 %. Такие параметры обменоспособности присущи средам с повышенным напряженным состоянием, флюидопотоком и значительными перепадами скоростей на границах разделов.

В результате сопоставления глубинных и

переобработанных по новым технологиям разрезов обменоспособности среды (рис. 2, а—в) составлены представления о гетерогенности и геодинамическом состоянии среды. На комплексных разрезах хорошо определяется сложная слоисто-блоковая структура земной коры, причем на глубинных разрезах видна дифференциация по расслоенности и определяются зоны тектонических нарушений, а на разрезах обменоспособности устанавливается геодинамическое состояние выделенных блоков и зон, их разграничивающих. Рассмотрим результаты новой обработки по каждому из профилей.

Профиль I пересекает Онежскую структуру с юго-запада на северо-восток и протягивается на 150 км. Распределению параметра A_{PS}/A_P в разрезе профиля соответствует сложный мозаичный рисунок (см. рис. 2, а). Отмечено несколько областей, где значения параметра A_{PS}/A_P выше среднего. На пикетах 0—15 км зафиксированы аномальные области на глубинах 35—55 км, где величина достигает 80—90 %, а на пикетах 15—25 км высокие значения зафиксированы на глубинах от верхов коры до верхов мантии. Этой аномальной области соответствует участок разреза, находящийся в створе глубинной Южной (Гирвасской) зоны разломов. Мощность земной коры (граница M_1) вдоль профиля изменяется от 36—37 км на юго-западе до 29,5—30,5 на северо-востоке. Между Лижемской и Тамбицкой зонами наблюдаются нарушенные и структурно измененные области подошвы земной коры. Самые значительные изменения захватывают кровлю и подошву зоны перехода кора—мантия в области мощной Уницкой зоны.

Профиль II протягивается с северо-запада на юго-восток на 120 км и пересекает основные разрывные структуры Онежского рудного района под более острым углом, чем профиль I (см. рис. 2, б).

Наиболее интересной является центральная часть разреза (пикеты 60—75 км), где прослеживается интенсивная площадная аномалия (70—80 %). По глубине она распадается на несколько областей: в верхней части коры (глубины 2—6 км), в средней части коры (20—30 км) и в низах коры, захватывая всю переходную зону кора—мантия. Сопоставимые с ней по интенсивности обменные волны зафиксированы в области верхней части коры на глубинах 10—15 км на пикетах 30—40 км (юго-восточнее Лижемской зоны разломов). Выделенный блок повышенной обменоспособности, захватываю-

щий всю кору и уходящий глубже в мантию, соответствует области сочленения Уницкой и Святухинско-Космозерской зон складчато-разрывных дислокаций.

Таким образом, Уницкая зона, сохраняющая напряженное динамическое состояние на уровне низов коры, имеет все шансы быть «печкой» для большей части Северо-Онежского синклинория. Оперяющие и соседствующие с ней зоны нарушений будут иметь следы многократных активизационных процессов. Она же прослеживается в юго-западном направлении за пределами разреза еще на 100 км.

На профиле б, четко структурированном по параметру обменоспособности между Святухинско-Космозерской и Тамбицкой зонами разломов на глубинах от 2 до 18 км, обнаруживается область повышенной обменоспособности и повышенной расслоенности верхней части земной коры. Профиль (см. рис. 2, в) пересекает площадь Северо-Онежского синклинория в его южной части и проходит через участки двух месторождений: Космозерского и Средняя Падма, а также вблизи кимберлитовой трубки Кимозеро. По этим трем пересекающимся разрезам составлена блок-диаграмма 3D (рис. 3) глубинного строения.

Глубинное строение по геофизическим данным. Северо-Онежский синклинорий. В результате сейсмологических исследований, выполненных ГПП «Невскгеология» в юго-восточной части Карелии, создана схема блокового строения земной коры для территории Онежской структуры и выделены площади, потенциально перспективные на поиски урана, на основании сравнительного анализа сейсмологических характеристик глубинных структур Заонежья и известных ураново-рудных районов. Наблюдениями МОВЗ установлено слоисто-блоковое строение литосферы региона, определена дифференцированная мощность земной коры и выявлены особенности морфологии переходного слоя кора—мантия, создана сейсмологическая модель глубинного строения района, проведено ранжирование по глубине заложения известных крупных тектонических нарушений и выявлен ряд новых глубинных структур [Шаров и др., 2011; Онежская..., 2011].

По результатам профильных наблюдений МОВЗ составлена схема глубинного строения района в масштабе 1:200 000. По результатам гравимагнитных съемок масштабов 1:50 000—1:200 000 получена схема блокового строения Онежской структуры, отражающая структур-

ный план верхней части земной коры. Сопоставление этих схем позволяет судить о развитии разломно-блоковой тектоники на разных глубинных уровнях земной коры, выявлять внутрикоровые магматические очаги, дифференцировать разрывные и блоковые структуры по глубинности заложения и, в какой-то мере, оценивать относительный возраст разломов [Онежская..., 2011].

Выделенный по данным МОВЗ Повенецкий блок, занимающий доминирующую часть площади синклинория, характеризуется исключительными особенностями глубинного строения, отличающими его от сопряженных структур и от других ранее изученных рудных провинций. Главной особенностью Повенецкого блока является интенсивная раздробленность земной коры множеством глубинных и глубоких разломов на мелкие микроблоки с различной сейсмической расслоенностью сред. Для блока, в целом, характерна эпизодическая, фрагментарная прослеживаемость первой (верхней) сейсмологической границы. Причем, она отмечается то на глубинах 1—3, то на 4—6 км. отождествлять эту границу с подошвой палеопротерозойских образований прогиба не следует без дополнительных детальных площадных сейсмических исследований, так как она глубже мощности осадочно-вулканогенных образований синклинория, рассчитанной по полю силы тяжести, и в то же время прослеживается в соседних с Повенецким блоком, представленных исключительно кристаллическими образованиями архея. Однако на профиле I (см. рис. 3, а) на ближних к ОПС участках первая граница фиксируется на глубинах 3,1—3,2 км (ПК 218—219) и 2,3—2,4 км (ПК 12). Между этими разноуровневыми значениями глубины первой фиксируемой границы располагается внутрикоровая клиновидная Кондопожская зона разломов. В районе ОПС на уровне 2,3—2,4 км фиксируется доломит-магнезитовые породы Туломозерской свиты. Уровень 3,1—3,2 км по данным ОПС соответствует гранитизированным породам архейского фундамента.

Повенецкий блок отличается сокращенной мощностью земной коры (от 28 до 35 км по границе M_I ; 40—45 км по границе M_{II} , при средней мощности коры для Фенноскандинавского щита 37—39 км по M_I ; 46—48 км по M_{II}) и относится к активизационным блокам с интенсивно проявленной гранитизацией [Онежская..., 2011].

На схемах глубинного и блокового строения

подчеркивается системность разрывных нарушений, вопрос об относительном возрасте которых крайне сложен, так как анализ геологических и геофизических материалов указывает на неоднократность подновления и активизации разрывных структур. Непосредственно для Повенецкого блока представляется следующий возможный вариант последовательности развития систем разрывных нарушений:

а) ортогональная субширотно-субмеридиональная система;

б) запад-северо-западная (290°) Сегозерско-Шайдомозерская система (ортогональная ей северо-северо-восточная система проявляется лишь фрагментарно, например субмеридиональный разлом в Пергубском блоке);

в) Хаутаваарско-Кондопожская система (25—30° и 300—310°), определившая, на наш взгляд, в значительной степени современное блоковое строение верхней части земной коры;

г) северо-западная и ортогональная ей северо-восточная системы (330 и 60°). Это система рудоперспективных структур (Лижемской, Уницкой, Святухинско-Космозерской, Тамбицкой и Кузарандовской, включая, вероятно, Волозерский разлом — 310÷320° и ортогональных им, слабее проявленных Войгубского (50°), Нивского (60°) и других разломов.

Для понимания глубинной природы сейсмического поля сопоставим результаты МОВЗ, полученные на Украинском щите в Кировоградском рудном районе и на Балтийском щите в Северо-Онежском синклинории.

Площадь **Кировоградского рудного района** исследована методами глубинного сейсмического зондирования и обменных волн землетрясений по плотной сети профилей широтного и субмеридионального направлений. И те, и другие пересекают Новоукраинско-Кировоградский гранитоидный массив, Корсунь-Новомиргородский рапакиви-анортозитовый массив, Кировоградскую и Звенигородско-Анновскую зоны разломов, а также стратифицированные породы ингуло-ингулецкой серии. Некоторые профили проходят в непосредственной близости от метасоматических урановых месторождений и месторождений лития и золота [Старостенко и др., 2011].

На основе корреляции геологических данных с материалами глубинного сейсмического зондирования была установлена пространственная связь указанных месторождений с широтным прогибом в рельефе раздела Мохо, получившим условное название мантийного рва [Старостенко и др., 2010]. Дополнительный

анализ данных обменных волн землетрясений позволил осветить гораздо более широкий круг вопросов о глубинном строении Кировоградского рудного района, поведении на глубину Новоукраинско-Кировоградского и Корсунь-Новомиргородского массивов и установить, каким именно образом мантийный ров соединяется с полосой концентрации рудных месторождений на поверхности.

Увязка профилей позволила построить серию каркасных блок-диаграмм поля обменных волн землетрясений (см. рис. 4) [Старостенко и др., 2011]. Они опираются на два меридиональных (IM, VIM) и два широтных (IIIМ, IVМ) профиля МОВЗ, которые были отработаны в разное время и отображают распределение обменных волн от различных землетрясений с разными эпицентрными расстояниями. В 2009—2010 гг. профили также обрабатывались по отдельности. И, тем не менее, в местах пересечения профилей аномалии A_{PS}/A_P совпадают друг с другом. Наиболее убедительный пример — узел пересечения профилей IM и IIIМ, в котором между собой согласуются не только аномальные, но и все изолинии параметра A_{PS}/A_P . Эти факты свидетельствуют о высокой надежности изложенного выше способа анализа поля обменных волн землетрясений.

Корсунь-Новомиргородскому массиву в интервале глубин 0—20 км присуща крупная аномалия A_{PS}/A_P . Она протягивается в меридиональном направлении на 60—70 км и в широтном направлении на 40—50 км, выходя за пределы обнаженной части массива. В узле пересечения профилей IM и IIIМ она достигает максимальной интенсивности более 80%. Вторая аномалия столь же высокой интенсивности зафиксирована на глубине около 40 км. Ее эпицентр находится вблизи раздела Мохо. Вторая аномалия либо отражает положение питающего канала для расположенной выше плитообразной интрузии анортозитов и гранитов рапакиви, либо указывает на положение промежуточной магматической камеры.

Под Новоукраинско-Кировоградским гранитоидным массивом аномалии A_{PS}/A_P протягиваются на меньшую глубину, имеют меньшую интенсивность и разделены почти вертикальными зонами фоновых значений этого параметра. Одна из них соединяет мантийный ров с широтной полосой концентрации месторождений урана, лития, золота на поверхности [Казанский и др., 2012].

О связи глубинного строения ОС с рудными месторождениями. При анализе глубин-

ного строения территории Онежской структуры обращает на себя внимание переменная мощность коромантийного переходного слоя [Онежская..., 2011]. Так в Северо-Онежском синклинории его наибольшая мощность от 10 по 14 км фиксируется в юго-восточной части на площади около 8000 км² (Петрозаводск—Волозеро—Водлозеро—Шокша—Петрозаводск) (рис. 5). Ее можно назвать Центрально-Онежской линзой андерплейтинга по географическому положению относительно Онежского озера. Ранее [Шаров и др., 2010], было высказано предположение о природе переходного коромантийного слоя как андерплейтингового явления, возникающего под влиянием мантийных плюмов при формировании ими крупных магматических провинций (КМП).

В пределах Онежской структуры выделено 4 КМП (сумийская, ятулийская, людиковийская и вепсийская), каждая из них, вероятно, имела не только поверхностное проявление, но и некоторый глубинный андерплейтинговый эквивалент. Оценить объем последнего пока не представляется возможным. Однако если предположить, что он связан в какой-то пропорции с поверхностным и близповерхностным объемами мафит-ультрамафитовых магматитов, то наибольшие мощности андерплейтингового слоя вероятно должны свидетельствовать о вкладе в его формирование нескольких КМП. Например, на профиле 6 (см. рис. 2, в) в пределах андерплейтингового слоя на глубине около 37 км выделяется субгоризонтальная граница, свидетельствующая о неоднородности его строения. Она может означать как минимум двукратное поступление магматических расплавов в резервуар, ограничения которого сверху и снизу фиксируют соответственно M_I и M_{II} .

Намечается пространственная связь наиболее мощной Центрально-Онежской линзы андерплейтингового слоя с наиболее значительными месторождениями металлических полезных ископаемых Онежского рудного района (см. рис. 5). Он характеризуется разными по генезису и возрасту месторождениями (осадочными, магматическими и метасоматическими), сформированными в палеопротерозое от 2,45 до 1,7 Ga [Металлогения..., 1999]. Это уникальный мировой объект по масштабам и уровню концентраций восстановленных форм углерода (шунгиты) в докембрии, отражающих интенсивность и длительность процесса флюидопереноса рудогенных компонентов, связанных с магматизмом [Онежская ..., 2011].

Наличие повышенной мощности андерплейтингового слоя, где, вероятно, проходила главная дифференциация мантийных магматических расплавов с отделением флюидных и рудных фаз, создала благоприятные условия для последующего внедрения обогащенных металлами магматических расплавов в верхние уровни коры и формирования там месторождений хромитов и титаномагнетитов с сопутствующими элементами.

Метасоматические комплексные уран-ванадиевые руды формировались в свекофенский тектонический (1,8—1,7 Ga) этап, который привел к существенным преобразованиям коры даже в пределах стабильного Карельского кратона, в том числе и Онежской структуры. С ним связаны крупнообъемные внедрения вепсийской основной магмы в Южно-Онежской мульде, а в Северо-Онежском синклинии собственно магматические проявления не установлены. Однако можно полагать, что магма не смогла в полной мере преодолеть при своем подъеме андерплейтинговый барьер, и лишь ее флюиды достигали верхних горизонтов коры. Важная роль этой магмы, вероятно, определилась созданием выступов и разрывов M_1 , а также сети разломов в верхней коре. Очевидно, связанный с ней флюидоперенос мог существенно усилиться за счет вовлечения в него некоторых породных ассоциаций Северо-Онежского синклиория, например солевого горизонта в основании онежского горизонта ятулия [Онежская..., 2011].

Следует отметить, что вепсийская магма, формировавшая Ропручейский силл, в ограниченном масштабе сама несла урановое оруденение, проявление которого известно на некоторых участках этого силла (Птицефабрика, Рыбрека) [Машковцев и др., 2010], расположенных южнее г. Петрозаводска.

По комплексу гравиметрических и сейсмологических данных определены структурные позиции рудоперспективных складчато-разрывных зон северо-западного простирания, проведена увязка последних с выявленными блоками земной коры и разрывными нарушениями других систем. Наблюдениями МОВЗ оценена глубинность рудоперспективных структур, установлено, что складчато-разрывные дислокации нижнепротерозойских образований Онежской структуры имеют в архейском кристаллическом основании глубинные швы, пересекающие земную кору на всю ее мощность. Прослеженное плановое положение глубинных швов рудоперспектив-

ных зон определяется северо-западными и субмеридиональными направлениями [Онежская..., 2011].

Закключение. Онежский рудный район — это месторождения хромитов, титаномагнетитов с платиноидами и золотом, а также урана — ванадия с комплексом других элементов. Исследования глубинного строения на основе корреляции геологических и сейсмических данных направлены на установление связей его поверхностных структур и рудных месторождений с локальными неоднородностями коры и раздела кора—мантия. Установлено, что месторождения пространственно связаны с наличием повышенной мощности андерплейтингового слоя, где, вероятно, проходила в палеопротерозое от 2,45 до 1,7 Ga главная дифференциация мантийных магматических расплавов суммийской и людиковийской КМП с отделением флюидных и рудных фаз. Она создавала благоприятные условия для последующего внедрения обогащенных металлами магматических расплавов в верхние уровни коры и образования там месторождений хромитов и титаномагнетитов с сопутствующими элементами. Метасоматические комплексные уран-ванадиевые руды формировались в свекофенский тектонический (1,8—1,7 Ga) этап, который привел к существенным преобразованиям коры и сопровождался вепсийским основным магматизмом и связанным с ним интенсивным флюидообразованием под воздействием мантийного диапира.

Раннепротерозойская металлогения Печенгского рудного района определялась мантийно-коровым взаимодействием, причем в интервале 2,4—1,7 Ga роль мантийных источников и процессов снижалась, а коровых — возрастала. Установлено деление коры региона на верхнюю (до 20—28 км) гетерогенную и нижнюю — гомогенную части. Выявлено локальное поднятие подошвы земной коры под Печенгской структурой, которое может быть обусловлено реликтовым мантийным плюмом [Казанский и др., 2006].

В Кировоградском рудном районе месторождения урана, золота, лития ассоциируются с локальным (среднемасштабным) прогибом в рельефе раздела Мохо (мантийным рвом), дискордантным по отношению к Новоукраинско-Корсунь-Новомиргородскому. Кировоградский полиметалльный рудный район рассматривают как палеопротерозойский центр коромантийного магматизма (мантийный диапир) и рудообразования. Он сформирован в интер-

вале 2,1—1,7 Ga путем последовательного совмещения трех этапов развития, которые различаются по ассоциациям интрузивных пород, характеру деформации и метаморфизма пород, происхождению и условиям локализации рудных месторождений [Казанский и др., 2012].

Требуется упомянуть о возможности ошибочной маркировки границ M_I и M_{II} в различных сейсмических методах, что приведет к неверной трактовке как рельефа каждой из границ раздела, так и мощности переходного слоя кора—мантия (андерплейтингового слоя). В МРС (МОВЗ) такая ошибка наименее веро-

ятна, так как эти границы (M_I и M_{II}) довольно часто прослеживаются одновременно.

Следовательно, на древних щитах в палеопротерозое локальные неоднородности раздела Мохо, скоростные и динамические особенности продольных и обменных волн в литосфере и соотношения с ними рудных месторождений не ограничиваются какой-то одной моделью. Однако можно утверждать, что для образования крупных рудных месторождений необходимы длительные многоэтапные глубинные геодинамические процессы, начиная с верхов мантии.

Список литературы

- Голубев А. И., Новиков Ю. Н. Геологическое строение и уран-ванадиевые месторождения Заонежья // Экологические проблемы освоения месторождения Средняя Падма. — Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2005. — С. 4—13.
- Казанский В. И., Лобанов К. В., Исанина Э. В., Шаров Н. В. От разреза Кольской сверхглубокой скважины к глубинной модели района бурения: корреляция структурно-петрологических, петрофизических и сейсмических данных // Рос. геофиз. журн. — 2006. — № 41—42. — С. 7—15.
- Казанский В. И., Макивчук О. Ф., Попов Н. И., Дрогицкая Г. М., Старостенко В. И., Трипольский А. А., Чичеров М. В. Глубинное строение и металлогения Кировоградского полиметального рудного района (Украинский щит): корреляция геологических и сейсмических данных // Геология рудных месторождений. — 2012. — 54, № 1. — С. 2—48.
- Коровкин В. А., Турьлева Л. В., Руденко Д. Г., Журавлев В. А., Ключникова Г. Н. Недрa северо-запада Российской Федерации. — Санкт-Петербург: ВСЕГЕИ, 2003. — 520 с.
- Машковцев Г. А., Константинов А. К., Мигута А. К., Щумилин М. В., Щеточкин В. Н. Уран Российских недр. — Москва: ВИМС, 2010. — 850 с.
- Металлогения Карелии / Отв. ред. С. И. Рыбаков, А. И. Голубев. — Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1999. — 340 с.
- Минерально-сырьевая база Республики Карелия. Кн. 1 / Отв. ред. В. П. Михайлов, В. Н. Аминов. — Петрозаводск: Карелия, 2005. — 280 с.
- Никитин А. А., Петров А. В., Алексахин А. С. Комплекс спектрально корреляционного анализа данных «КОСКАД 3D». — Москва: Изд. Моск. геологоразвед. ун-та, 2004. — 158 с.
- Онежская палеопротерозойская структура (геология, тектоника, глубинное строение и металлогения) / Отв. ред. Л. В. Глушанин, Н. В. Шаров, В. В. Щищов. — Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2011. — 431 с.
- Старостенко В. И., Казанский В. И., Попов Н. И., Дрогицкая Г. М., Заяц В. Б., Макивчук О. Ф., Трипольский А. А., Чичеров М. В. От поверхностных структур к интегральной глубинной модели Кировоградского рудного района (Украинский щит). I // Геофиз. журн. — 2010. — 32, № 1. — С. 3—33.
- Старостенко В. И., Казанский В. И., Попов Н. И., Дрогицкая Г. М., Заяц В. Б., Макивчук О. Ф., Трипольский А. А., Чичеров М. В. От поверхностных структур к интегральной глубинной модели Кировоградского рудного района (Украинский щит). II // Геофиз. журн. — 2011. — 33, № 5. — С. 3—16.
- Шаров Н. В., Исанина Э. В., Заможняя Н. Г., Крупнова Н. А., Сулейманов А. К. Результаты глубинных сейсмических исследований методами ОГТ, ГСЗ и МОВЗ Онежско-Ладожской площади (Республика Карелия, Россия) // Геофиз. журн. — 2011. — 33, № 3. — С. 23—39.
- Шаров Н. В., Куликов В. С., Куликова В. В., Исанина Э. В., Крупнова Н. А. Сейсмогеологическая характеристика юго-восточной части Фенно-скандинавского щита (Россия) // Геофиз. журн. — 2010. — 32, № 3. — С. 3—17.
- Яновская Т. Б., Дмитриева Л. А. Влияние нежесткости контакта упругих сред на коэффициент отражения, преломления и обмена // Изв. АН СССР. Физика земли. — 1991. — № 5. — С. 17—22.